

LA FIBRE LIGNO-CELLULOSIQUE DES POACEES¹ PERENNES EN C4 L'EXEMPLE DE LA CANNE A SUCRE

**PISTES DE RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR AMELIORER
LA PRODUCTION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DE FIBRE**

Montpellier, novembre 2009



La matière première : livraison de cannes à sucre, coupe manuelle dépaillées, à la balance de Vidon (Marie-Galante)

CIRAD Montpellier, UR102, Equipe 3.
Laboratoire de Technologie et de caractérisation des fibres naturelles
Contact : denis.pouzet@cirad.fr

¹ Nom scientifique *Poaceae*. Ancienne appellation : *Gramineae* (graminée).

Table des Matières

AVANT-PROPOS	9
I. LA PRODUCTION DE FIBRE.....	11
1. Caractérisation de la ressource.....	11
11. La plante	11
12. La fibre de canne à suce.....	14
13. Incidence du sucre sur la production de fibre	15
131. Le rendement en fibre.....	15
132. La qualité de la fibre	16
14. Intérêt de la canne à sucre comme source de fibre.....	16
141. La culture et l'environnement.....	17
142. Approche économique.....	18
2. La production fibreuse de la filière sucrière.....	20
21. La bagasse.....	20
23. La Biomasse résiduelle	21
231. Production	21
232. Composition	21
233. Intérêt pour la fibre	23
234. Conséquences agronomiques de l'exportation des pailles	24
3. Les potentialités de production de fibre	26
31. Stratégie de production.....	26
32. Les choix variétaux.....	27
321. Les antagonismes sucre - fibre.....	27
322. L'amélioration variétale	28
II. LA FIBRE DANS LA PLANTE.....	33
1. La tige.....	33
11. Caractéristiques.....	33
12. Anatomie.....	33
121. Constitution des tiges.....	33
122. Conséquences agronomiques	34
13. Croissance et floraison.....	34
131. Croissance	34
132. Floraison	35
a. Processus.....	35
b. Conséquences agronomiques	36
14. Déterminisme de la floraison.....	36
141. Objectifs	36
142. Caractérisation de l'évènement.....	37
143. Les étapes de la floraison	37
144. La photopériode	38
145. L'âge	39
146. L'incidence du climat	40
a. La nébulosité.....	40
b. La température.....	40
c. L'alimentation hydrique.....	41
d. Autres paramètres	42
147. L'alimentation minérale	42

15. Conséquences agronomiques	43
151. Les recherches à développer	43
152. La gestion de la floraison	44
2. La feuille	44
21. La Gaine	45
22. Le limbe	45
III. COMPOSITION ET SYNTHÈSE DES FIBRES.....	47
1. Origine des fibres	47
2. Les composantes chimiques	48
21. Composition globale	48
22. Composition des sources de fibre	49
221. Les principaux constituants	49
222. La silice	51
23. Évolution des constituants au cours du cycle	52
3. Les principaux polymères glucidiques.....	53
31. La cellulose	53
311. Caractérisation du polymère.....	53
312. Rôle et intérêt	55
32. Les hémicelluloses	56
321. Caractérisation du polymère.....	56
321. Rôle et utilité	58
4. Les lignines et phénols associés	59
41. Introduction	59
42. Origine métabolique et composition	60
421. Le métabolisme secondaire des phénols.....	60
422. La biosynthèse des lignines	61
a. Constitution.....	61
b. Rôle et intérêt des acides phénoliques	64
43. Principales caractéristiques	65
431. Propriétés physico-chimiques et applications	65
432. Importance biologique des lignines	67
a. Enherbement	67
b. L'azote	68
c. Les pathogènes	68
d. Le stress et les bio-agressions	68
e. La matière organique	69
44. Modulation de la biosynthèse des lignines	71
441. Point des connaissances.....	71
442. Lignines et qualités agronomiques	72
45. Le dosage des lignines.....	75
5. Synthèse et agencement chimique	75
51. La paroi cellulaire.....	75
52. Les Sites de synthèse de la lignocellulose.....	76
53. Chronologie de la synthèse des parois	77
531. La lamelle moyenne.....	78
532. La paroi primaire.....	78
533. La paroi secondaire.....	78
54. Organisation des polymères pariétaux.....	79
6. Quelques pistes de recherche	81

IV. LES OPERATIONS POST-RECOLTE	83
1. Introduction	83
2. Caractérisation de la ressource.....	83
21. La fibre brute	83
211. Les facteurs de qualité	83
212. La granulométrie	85
213. Composantes de la bagasse	86
a. La fibre brute	86
b. La moelle	87
3. Le démoellage	87
31. Introduction	87
32. Intérêt.....	88
33. Démoellage dédié aux fibres	89
34. Démoellage de la bagasse	90
341. Méthodes	91
342. Résultats	91
343. Rendement et usages.....	92
4. Le stockage	93
41. Nécessité	93
42. Principales contraintes au stockage.....	94
421. L'humidité	94
422. La fermentation	95
423. La densité	96
43. Quelques méthodes de stockage.....	96
431. La voie humide.....	96
432. Les voies sèches.....	97
a. Séchage biologique	97
b. Séchage physique	97
433. Comparaisons et évolution	98
434. Cas particulier de la biomasse résiduelle.....	98
435. Quelques données économiques	99
V. USAGES ET PROCEDES INDUSTRIELS	101
1. Principaux usages.....	101
2. Utilisation de la fibre brute.....	102
3. La défibrage	104
51. La fibre élémentaire.....	104
52. Les procédés de défibrage	105
521. Introduction	105
522. Objectifs	106
523. Actions mécaniques et biologiques.....	106
524. Défibrage chimique.....	106
525. Défibrage par explosion à la vapeur	108
REFERENCES.....	111

Tableaux

Tableau 1 : Potentialité de quelques cultures (Alexander, 1885 ; Hunsigi, 1995).....	17
Tableau 2 : quelques données sur la biomasse résiduelle d'une culture de canne à sucre.....	21
Tableau 3 : Répartitions pondérales de la matière sèche par acre (4046,9 m ²).....	23
Tableau 4 : Composition moyenne de la biomasse cannière.....	23
Tableau 5 : Récolte de la biomasse résiduelle avec une presse haute densité au Brésil.....	25
Tableau 6 : Performance agronomique d'un hybride sélectionné pour la fibre en Floride.....	29
Tableau 7 : Composition de la bagasse de canne à sucre en % MS.....	49
Tableau 8 : Répartition moyenne de la matière sèche de la bagasse de canne à sucre.	50
Tableau 9 : Compositions chimiques en %MS de fibres lignocellulosiques.....	50
Tableau 10 : Compositions de la biomasse de cultivars indiens de canne à sucre.....	51
Tableau 11 : Degrés de polymérisation stabilisé de microfibrilles celluloses 55	55
Tableau 12 : Monosaccharides des hémicelluloses de la bagasse (%).....	57
Tableau 13 : Les trois constituants des lignines 61	61
Tableau 14 : Caractéristiques des lignines et divergence des plantes terrestres.....	63
Tableau 15 : Pouvoirs calorifiques de quelques composantes de la lignocellulose (MJ/ kg de MS).....	70
Tableau 16 : Répartition de la lignine dans les principaux tissus de la canne à sucre 79	79
Tableau 17 : Principaux composés phénoliques dans la moelle de bagasse.....	87
Tableau 18 : Pourcentages des différentes parties de la tige de canne à sucre.	89
Tableau 19 : Compositions moyenne en % de la fibre d'écorce de canne à sucre.....	90
Tableau 20 : Effet du démoillage sur la composition physicochimique de la bagasse.....	91
Tableau 21 : Caractérisations de l'humidité en % des différentes parties de la canne à sucre.....	94
Tableau 22 : Distribution de la matière sèche de 39 cultivars en sélection.....	95
Tableau 23 : Densité de la biomasse laissée au sol après récolte de la canne à sucre.....	96
Tableau 24 : Quelques méthodes de conservation des fibres de bagasse.....	98
Tableau 25 : Résistance à la traction (tensile strenght) en MPa de composites polystyrène/fibre 103	103
Tableau 26 : Dimensions en des fibres « ultimes » de quelques cultures.....	104
Tableau 27 : Dimensions comparées de la bagasse démoillée et de la moelle 105	105
Tableau 28 : Extractions de la cellulose à partir de bagasse de canne à sucre « décirée » 107	107
Tableau 29 : Bilan des deux techniques exprimé en composé solide résiduel principal.....	109
Tableau 30 : co-produits chimiques de la phase solide en g pour 100g de bagasse brute.....	109

Figures

Figure 1 : Quelques éléments de classification botanique	11
Figure 2 : Allocation de la biomasse cannière d'après Dillewijn, 1960	22
Figure 3 : Température min. et floraison (Coleman, 1983).....	41
Figure 4 : Azote et floraison (Gosnell, 1973).....	42
Figure 5 : Evolution de la fibre de canne à sucre au cours du cycle.....	52
Figure 6 : Fibre élémentaire de cellulose.....	54
Figure 7 : Microfibrille de cellulose	55
Figure 8 : Quelques molécules importantes du métabolisme des phénylpropanoïdes.....	60
Figure 9 : Les lignines dans le métabolisme des phénylpropanoïdes.....	62
Figure 10 : Organisation des parois cellulaires	76
Figure 11 : Structure d'après Goring, 1977	80
Figure 12 : Structure d'une microfibrille	81
Figure 13 : Répartition massique des particules de bagasse.....	85
Figure 14 : Coupe d'une tige d'après Clements, 1980	86

Photos

<i>Photo 1 : Variétés "sauvages" des collections du CERF.....</i>	<i>12</i>
<i>Photo 2 : Production de Bagasse, Distillerie Bellevue (Marie-Galante).....</i>	<i>14</i>
<i>Photo 3 : Brûlis avant replantation de la canne (Marie-Galante).....</i>	<i>15</i>
<i>Photo 4 : Quelques cultures pérennes à haut potentiel photosynthétique</i>	<i>17</i>
<i>Photo 5 : Modalités de récolte et gestion de la biomasse</i>	<i>20</i>
<i>Photo 6 : Quelques modalités de gestion de la biomasse résiduelle.....</i>	<i>24</i>
<i>Photo 7 : Variabilité de la floraison de la canne à sucre à la récolte.....</i>	<i>35</i>
<i>Photo 8 : Cannes brûlées.....</i>	<i>84</i>

AVANT-PROPOS

Cette note bibliographique porte sur les facteurs agronomiques liés à la production quantitative et qualitative de fibre de Poacées. L'objectif est de participer à la construction d'un programme de recherche pour l'équipe. Il est aussi de donner des informations de base sur l'agronomie de la canne à sucre aux non spécialistes de la culture. Le caractère généraliste de l'approche implique que les choix ne pourront s'affranchir du préalable d'une étude bibliographique plus spécifique.

La biomasse lignocellulosique des plantes est une ressource abondante, peu onéreuse renouvelable et largement sous employée. Elle est essentiellement composée par les fibres constitutives des parois cellulaires. La biomasse est ainsi une importante ressource de fibres renouvelables. Les Poacées tropicales à multiplication végétative sont les plantes les plus performantes pour la production de biomasse. Elles ont le rendement photosynthétique le plus élevé des plantes terrestres. Leur mode de reproduction leur octroie un avantage écologique et une meilleure tolérance aux aléas climatiques. Elles peuvent en effet faire l'objet de récoltes annuelles multiples à partir d'une seule plantation. Les Poacées en C4 présentent en outre un bon niveau de tolérance aux stress biotiques et abiotiques.

La canne à sucre, plante très étudiée, est le modèle type des Poacées tropicales à multiplication végétative. L'intérêt pour la biomasse lignocellulosique des Poacées n'est pas nouveau. Il a été historiquement démontré par les études d'Alexander (1973) à Puerto Rico, qui soulignent la potentialité exceptionnelle des cannes fibreuses et des *Pennisetum purpureum*. L'idée devient aujourd'hui porteuse car les problématiques de réchauffement climatique et raréfaction des ressources énergétiques fossiles ont entraîné une forte pression de recherche technologique sur l'usage de la biomasse.

La biomasse lignocellulosique de la canne à sucre est un déchet encombrant, partiellement valorisé sous forme énergétique, qui représente approximativement la moitié non employée de la production. Les conditions économiques et environnementales sont aujourd'hui favorables aux usages de la lignocellulose. Sa valorisation est cependant limitée par la séparation de ses composantes du fait (1) d'une grande stabilité chimique et (2) de la multiplicité des composants et de leurs dilutions. Ces contraintes sont les objectifs de recherches en cours.

Les problématiques agronomiques liées aux productions de fibres sont proches de celles déjà traitées pour la production d'énergie (Pouzet et Lejars, 2008). Nous n'abordons donc que les spécificités agronomiques liées à la production de fibre.

La valorisation des fibres dépend beaucoup des qualités mécaniques du contenu cellulosique. L'extraction de la cellulose, à des niveaux de pureté adaptés aux usages, produit des dérivés chimiques d'hémicellulose et des lignines. La valorisation de ces nouveaux co-produits ouvre les portes de la chimie verte. Ceci justifie d'évoquer les pistes de valorisation chimique en traitant la production de fibre.

Les usages fourragers, concurrentiels pour la cellulose et les hémicelluloses, ne sont pas abordés. Rappelons cependant que les recherches sur les fourrages contribuent largement à la connaissance de la lignocellulose de la culture.

Nous évoquons dans cette note les usages des fibres et les principaux procédés industriels associés. Ces parties post-production des filières permettent de mettre en valeur les objectifs de qualité de la production et la nature des co-produits à valoriser.

Les fibres de canne à sucre sont employées pour produire des matériaux de construction (parpaing, toiture...) ; des panneaux (meubles, isolants...) ; des géotextiles, mats et autres matériaux non tissés dont ceux issus de l'industrie papetière (filtres, couches, papiers, cartons ...) ; des matières plastiques avec des rôles de remplissage et de modification des propriétés mécaniques des matériaux (nanofibres...). Les usages actuels les plus fréquents aujourd'hui sont le papier et les panneaux.

Les fibres de canne à sucre ne se prêtent pas à la fabrication de fils textiles. Leur contenu cellulosique permet cependant la production de viscose et de rayonne qui sont plus du domaine de la chimie verte (polymères).

Nous abordons successivement le processus de production agricole des fibres de canne à sucre, l'origine des fibres dans la plante et la composition de la fibre. Nous traitons ensuite des problèmes post-récolte et nous évoquons enfin les procédés industriels mis en œuvre pour les produits finis principaux.

I. LA PRODUCTION DE FIBRE

1. Caractérisation de la ressource

1.1. La plante

La canne à sucre est une Poacée à cycle photosynthétique en C4 qui se propage par voie végétative. Elle appartient à la tribu des *Antropogoneae* qui rassemble, avec la tribu des *Paniceae* les plantes ayant le meilleur potentiel photosynthétique des plantes terrestres.

La classification botanique des Poacées est ancienne et varie d'un auteur à l'autre. Elle ne prend pas en compte les connaissances génétiques contemporaines (Alix et al. 1999 ; Jannoo et al. 1999 ; D'Hont et al. 1995), qui remettent en cause les notions botaniques d'espèce et de genre. La canne à sucre est ainsi classée dans le groupe Saccharum (*Saccharum complex*), imaginé par Mukherjee (1957) pour rassembler les espèces et les genres interfertiles de la tribu des *Andropogoneae* qui sont apparentés à la canne à sucre cultivée (Figure 1).

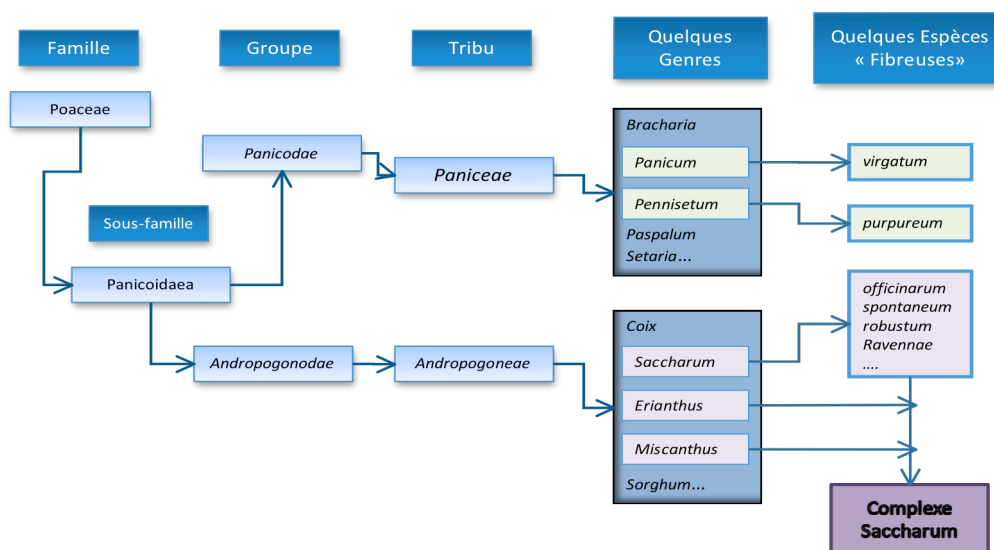


Figure 1 : Quelques éléments de classification botanique

Le complexe Saccharum rassemble la canne à sucre dite noble (*Saccharum officinarum*), des sous-espèces sauvages (Photo 1) comme *Saccharum spontaneum* (très fibreux à fort tallage) ou *Saccharum robustum* et quatre genres dont deux importants : *Miscanthus* et *Erianthus*, et deux moins étudiés : *Sclerostachya* et *Narenga*.

Les variétés cultivées de canne à sucre sont des hybrides de *Saccharum officinarum* dans lesquels on retrouve une partie du patrimoine génétique des plantes du complexe Saccharum. Pour D'Hont et al (1996) et Piperidis et D'Hont (2001), le génome de la canne à sucre cultivée provient pour environ 80 % de *S. officinarum*, pour 10 à 15 % de *S. spontaneum* et pour 5 à 10 % de recombinaison entre les 2 espèces. La part de *S. spontaneum* peut donc approcher les 25 % du génome.

La canne à sucre est hautement polyploïde avec une forte fréquence d'aneuploïdie. D'Hont et al. (1998) émettent l'hypothèse que le nombre de chromosomes de base est de 10, comme c'est le cas de la majorité des plantes de la tribu des *Andropogoneae*, exception faite notamment de *S. spontaneum* qui dispose de 8 chromosomes de base (Ha et al. 1999). Les 5 cytotypes principaux des *Saccharum* ont $2n = 64, 80, 96, 112$, et 128 chromosomes avec certains types dépassant les 200 et la présence de chromosomes en nombre anormal (aneuploïdie).



S. spontaneum (Réunion)

Erianthus sp. (Réunion)

Photo 1 : Variétés "sauvages" des collections de eRcane¹

Le genre *Miscanthus* (*miscanthus*), d'origine asiatique (Chine, Japon, Corée) regroupe de nombreuses espèces et hybrides interspécifiques parmi lesquels figurent les variétés les plus performantes pour produire de la biomasse en région tempérée, ainsi que de nombreuses variétés ornementales (*Eulalie*). La taxonomie du genre est confuse et il existe beaucoup de synonymes pour les appellations scientifiques comme vernaculaires (Brancourt, M. et Amoult, S., INRA Lille, UMR 1281, 2007)². Les espèces couramment citées sont le *M. sinensis* (roseau de chine, susuki, chinese silvergrass, japanese silvergrass) et le *M. sacchariflorus* (chinese silvergrass, ogi). En dehors de l'INRA, il existe une importante collection de *miscanthus* en Angleterre, à l'université d'Aberystwyth³.

La principale espèce de *miscanthus* exploitée pour la biomasse est le *Miscanthus x giganteus* Gref et Deu (Hodkinson et Renvoize, 2001) a été testée en Europe il y a moins d'un siècle. Il s'agit d'un hybride allotriploïde ($3n=57$) stérile dont l'origine, selon Rayburn et al. (2009), serait un croisement naturel entre une espèce tétraploïde, *M. sacchariflorus* ($4n=76$) et une espèce diploïde, *M. sinensis* ($2n=38$). Cet hybride, qui se multiplie par rhizomes, dispose d'appellations multiples⁴. Un de ses noms communs, **asian** elephant grass, est souvent transcrit à tort sous la forme simplifiée d'elephant grass, qui est l'une des appellations de *Pennisetum purpureum*. Les bases génétiques de la culture sont donc très étroites.

¹ <http://www.ercane.re> Nouvelle appellation du Centre d'Essai, de Recherche et de Formation (CERF), de l'île de la Réunion

² http://www.lille.inra.fr/science_pour_tous/dossiers_thematiques/miscanthus_un_encouragement_pour_les_bioenergies/questions_reponses_pour_tous_1/a_quelle_famille_botanique_appartient_elle

³ IBERS (Institute of Biological, Environmental and Rural Sciences).

⁴ *M. sinensis* var *giganteus* ; *M. sinensis* "giganteus" ; *Miscanthus x ogiformis* Honda « *Giganteus* » ; *M. 'Giganteus'* ; *M. 'giganteus'* ; *M. floridulus*.

Les bons candidats pour la production de fibre de la tribu des *Andropogoneae* sont les plantes qui se multiplient par voie végétative¹ (clones) et disposent d'une bonne aptitude à la repousse². C'est le cas de la canne à sucre dont la production de graine ne présente d'intérêt que pour la création variétale. Le processus de floraison est un caractère agronomique négatif³ que la sélection tend à supprimer (*Ch.II-§1321*). Le mode de multiplication de la culture par bouture présente cependant deux inconvénients :

1. Les coûts de plantation sont plus élevés que ceux d'un semis, mais ils sont amortis sur de nombreuses années d'exploitation ; et
2. Les boutures ne constituent pas comme la graine une barrière aux pathogènes. Des mises en quarantaines coûteuses et longues⁴ freinent donc les échanges entre les pays producteurs. Ceci limite fortement la variabilité exploitable par la sélection.

L'extension géographique considérable des plantes du complexe *Saccharum* pourrait permettre au CIRAD de conduire une partie des recherches à vocation tropicale, depuis des sites méditerranéens voir tempérés. La canne à sucre est produite sous irrigation en zone méditerranéenne (sud de l'Espagne, Maroc, Egypte...).

Le *Miscanthus x giganteus* est la référence en matière de potentialité pour la production de biomasse sous des régimes thermiques contraignants. Sa résistance au froid est remarquable. Les jeunes pousses résistent à -8°C, les rhizomes à -3,5°C tandis que la photosynthèse débute à 6°C et qu'elle est bien établie à 10°C. Cette dernière valeur est communément adoptée pour les modèles de croissance. Le modèle de prédiction de croissance écophysologique WIMOVAC a été paramétré pour le *Miscanthus x giganteus* (Miguez et al. 2009). **Nous pourrions envisager de valider le modèle MOSICAS sur un *Miscanthus* sp. à partir de recherches conduites sur des sites expérimentaux de l'INRA.** L'*Erianthus* se développe dans les régions tempérées dont il est en partie originaire et où sa prolificité en fait parfois une peste végétale.

Cette large extension géographique du groupe *Saccharum* repose notamment sur une large variabilité d'adaptation au froid. Burner et al. (2009) constatent que les hybrides F1 entre *Saccharum* sp. et *Miscanthus sinensis* sont plus tolérants au froid que les hybrides entre *Saccharum* sp. et *Saccharum spontaneum*. Lam et al. (2009) soulignent l'intérêt d'intégrer les caractéristiques de tolérance au froid de *Saccharum spontaneum* et de *Miscanthus*, pour étendre la zone d'expansion de la canne à sucre vers les zones tempérées. Du et al. (1999) montrent que la variabilité de comportement au froid. Le cultivar d'origine tropicale Badira (*Saccharum officinarum*) exposé au froid subit une sévère photo-inhibition qui décroît de 50% son activité photosynthétique. L'hybride NIF4 (*Saccharum* sp) dont le patrimoine génétique est partagé entre tropique et sub-tropique ne modifie pas son comportement photosynthétique avec le froid. La photosynthèse s'accroît même de 20 à 30 % à 10° C. Le cultivar Yomotanza (*Saccharum sinense*) d'origine sub-tropicale a un comportement

¹ Cette caractéristique n'est pas généralisable. Certaines variétés d'*Erianthus* (absence d'ocrea) n'ont pas de bourgeons axillaires et ne peuvent donc être multipliés à partir de portions de tige. Le clonage est alors réalisé à partir de la souche. Autre particularité, certaines variétés de *S. spontaneum* développent des tiges souterraines à partir desquelles elles se propagent.

² Le sorgho, cultivé dans des zones à une ou deux saisons des pluies alternées par des saisons sèches très marquées, se multiplie par graine avec un cycle de production court (3 ou 4 mois). Les études récentes de l'ICRISAT semblent montrer cependant une bonne aptitude à la repousse après récolte. Des recherches débutent pour caractériser le phénomène et en évaluer l'intérêt agronomique.

³ Exception faite de variétés sélectionnées pour fleurir. La floraison s'accompagne d'une chute de production, mais d'un enrichissement en sucre recherché à une période précise de la récolte. La fenêtre de récolte est alors très étroite car les pertes de production deviennent importantes dès le mois suivant la floraison.

⁴ La quarantaine du CIRAD demande un délai minimum de 2 ans pour produire des boutures exempte des maladies connues. Trois ans sont nécessaires si le matériel d'origine est en mauvais état sanitaire.

intermédiaire. Les auteurs mettent en relation le potentiel photosynthétique et le niveau dans la feuille des principales enzymes impliquées.

L'héritabilité des caractères de résistance au froid est exploitable dans des conditions telles que l'île de La Réunion, où les gradients thermiques de la zone cannière sont importants (culture jusqu'à près de 1000 m d'altitude)¹.



Photo 2 : Production de Bagasse, Distillerie Bellevue (Marie-Galante)

12. La fibre de canne à sucre

La canne à sucre est une plante herbacée (*nonwood, herbaceous*) cultivée pour le sucre. L'extraction du jus sucré des tiges produit des déchets lignocellulosiques communément appelé bagasse², qui constituent la source principale de fibre de la culture (*Photo 2*). La biomasse résiduelle, non exploitée lors de la récolte des tiges, constitue une seconde source de fibres. Ces résidus qualifiés de paille (*sugarcane straw*) sont composés de feuilles, d'extrémités de tiges et de tiges perdues lors de la récolte.

La bagasse provient de cultivars sélectionnés pour le sucre et non la fibre. Elle est surtout exploitée comme source d'énergie dans les sucreries.

La biomasse résiduelle n'est pratiquement jamais valorisée. Elle sert occasionnellement de source de carbone pour assainir les effluents d'élevage. Elle est le plus souvent laissée au sol si le climat permet sa décomposition. Dans le cas contraire, elle est brûlée. Elle est systématiquement brûlée lors des replantations (*Photo 3*) car son volume contraint fortement les techniques culturales d'implantation de la culture.

¹ Une thèse est en cours sur le sujet à La Réunion dans le cadre de l'UR102 (C. Poser).

² Le terme bagasse n'est pas associé à la canne à sucre de manière bijective. La bibliographie y fait aussi référence pour définir les résidus fibreux de sorgho ou de manioc. Il s'agit aussi d'un bois de Guyane (famille des Moracées).



Photo 3 : Brûlis avant replantation de la canne (Marie-Galante)

La fibre de canne à sucre disponible aujourd'hui est donc un résidu du sucre. Sa production et sa qualité dépendront des processus agronomiques et industriels de la filière sucre.

La canne à sucre a un cycle économique de culture de 5 à 6 ans. On considère au-delà, que le déclin de densité rend le désherbage problématique, et que l'alimentation minérale et hydrique tend à être moins performante. Cette limite est une conséquence de dessouchages et de tassement que la mécanisation de la culture additionne au fil des cycles. Dans des conditions d'itinéraire technique conservateur, la durée de vie économique de la culture dépasse très largement 10 ans. Certaines parcelles en production manuelle peuvent ainsi conserver un niveau acceptable de production après quinze à vingt ans d'exploitation.

Le cycle de récolte de la canne à sucre est généralement annuel¹ avec des écarts pouvant aller de 12 à 14 mois. La récolte correspond à une phase de maturation qui s'étale en général sur une période de 5 à 6 mois selon les conditions pédoclimatiques. La maturation correspond en effet à des stress hydrique-azoté et thermiques, qui favorisent l'accumulation de sucre dans les tiges et ralentissent la croissance de la culture et sa production de fibre.

La production de fibre dans les tiges, est très peu étudiée en dehors de la période de maturation pour le sucre. Les rares informations disponibles proviennent d'études sur l'alimentation animale.

13. Incidence du sucre sur la production de fibre

131. Le rendement en fibre

La production de fibre est contrainte par l'orientation sucrière de la culture. La sélection pour le sucre conduit à des plantes plus hydratées, moins fibreuses et moins productives. L'itinéraire technique est entièrement conçu pour optimiser la teneur en sucre. Les périodes de récolte sont imposées par l'adéquation entre le niveau de richesse atteint, et celui requis pour l'extraction.

Le sucre recherché est un soluté et l'accroissement de la concentration en sucre a une incidence sur l'hydratation de la plante. Si les principales variétés sucrières ont en moyenne

¹ La première récolte est souvent effectuée après un cycle d'un an et demi car la vitesse d'implantation du couvert est plus faible à partir de bouture que par repousse de souche. Des cycles uniques (culture et production) de 24 mois ont été développés à Hawaï. La récolte au « bull » s'affranchissait alors des problèmes de verse. Les cycles longs rendus possibles par la croissance continue de la culture sont évités du fait des risques de verse et d'incendie.

entre 28 et 30 % de matière sèche, les variétés plus fibreuses en collection peuvent atteindre voir dépasser les 40 % de matière sèche. L'hydratation a une influence sur l'économie de production et son empreinte environnementale. Elle joue en effet sur les coûts de récolte et de manipulation post-récolte ; les coûts de stabilisation de la bagasse et le volume des effluents industriels.

Rappelons par ailleurs que la teneur en matière sèche est une caractéristique essentielle pour tout usage énergétique. L'énergie produite est en effet moins que proportionnelle à l'hydratation (Klass, 1998).

La sélection pour le sucre conduit à des cultivars pauvres en fibre du fait d'un antagonisme entre les allocations de biomasse vers la fibre et vers le sucre (Ch.I-§321). Les procédés industriels d'extraction du sucre imposent une forte concentration en sucre des cannes et des facilités de broyage. Ces normes sont toutes deux défavorables à la production de fibre. Les teneurs en fibres des cannes sélectionnées pour le sucre se situent entre 13 et 15 %. Le matériel végétal riche en sucre peut atteindre 17 à 18 % de fibre, mais les industriels acceptent difficilement des cannes ayant plus de 15 % de fibre. Certaines informations, non publiées, mentionnent parfois des taux de fibre de plus de 50 % pour des variétés du complexe *Saccharum*.

La variabilité génétique du contenu fibreux de la plante est donc importante et quasi inexploitée. Les possibilités d'accroissement de la production de fibre sont exceptionnelles et du domaine du court terme.

Les sélectionneurs font état d'une corrélation négative entre la biomasse totale produite et la richesse en sucre (Ch.I-§321). Cette interaction est d'autant plus préjudiciable à la production de fibre que la corrélation entre la richesse en sucre et le rendement industriel à l'extraction est fortement positive et que l'extraction n'est plus rentable voir plus possible lorsque la dilution est trop faible¹.

132. La qualité de la fibre

Les caractéristiques qualitatives de la fibre de canne à sucre sont également conditionnées par les processus industriels dédiés au sucre. Wood (1981) mentionne que le broyage intensif des tiges de canne à sucre diminue la valeur papetière des fibres. Pour Chiparus et Chen, (2003), les procédés mécaniques d'extraction du jus sucré ont une incidence sur la longueur des fibres et la variabilité de cette longueur. Or, ces caractéristiques sont des éléments déterminants de la qualité des fibres pour les principaux usages industriels (Laurie, 1978).

Le procédé industriel d'extraction du sucre agit sur la teneur en sucres résiduels dans la bagasse. Il détermine ainsi les conditions économiques du stockage de celle-ci (Ch.IV-§4).

La bagasse est donc, selon les modalités de production du sucre, un mélange de fibres plus ou moins fermentescibles de longueur et le diamètre très variables.

14. Intérêt de la canne à sucre comme source de fibre

La connaissance des caractéristiques physicochimiques et mécaniques des fibres de canne à sucre revêt aujourd'hui un intérêt stratégique pour des raisons scientifiques, environnementales et économiques. Cette connaissance s'inscrit dans les stratégies d'intensification écologique et de reproductibilité des systèmes de culture.

¹ Par exemple pour l'usine de Gardel en Guadeloupe, l'extraction industrielle n'est plus rentable en dessous de 6% de richesse.

141. La culture et l'environnement

Les plantes du complexe *Saccharum* ont, avec le *Pennisetum purpureum*, (Photo 4) le potentiel le plus élevé des plantes terrestres (Klass, 1998).



Canne à sucre (Marie-Galante)



Pennisetum purpureum (Guyane)

Photo 4 : Quelques cultures pérennes à haut potentiel photosynthétique

Les potentialités de production de la canne fibreuse sont très supérieures à celles d'arbres à croissance rapide (Tableau 1). Les Poacées en C4 présentent ainsi un intérêt considérable pour la production renouvelable et son intensification.

Tableau 1 : Potentialité de quelques cultures (Alexander, 1885 ; Hunsigi, 1995)

Espèces	Biomasse (t/ha/an)	Récolte (mois)
<i>Eucalyptus</i> (hybride 1)	29,4	24
<i>Eucalyptus robusta</i>	38,3	24
Sordan 70A*	44,5	12
Napier grass**	65,7	12
<i>Eucalyptus</i> (hybride 2)	66,5	36
Canne fibre (fuel canne)	103,7	12

* hybride sorgho x sudan grass ; **une des nombreuses appellation du *Pennisetum purpureum*

Ces plantes ont en outre des caractéristiques exceptionnelles qui en font des cultures à faible empreinte écologique¹. Ces qualités s'étendent à la plupart des Poacées en C4 à multiplication végétative comme le *Pennisetum virgatum* (switchgrass), qui est avec le *Pennisetum purpureum* un bon candidat pour la production de fibre (Vincente-Chandler et al. 1959 ; McLaughlin et al. 2002 ; Allison et Pammenter, 2005).

Les Poacées qui nous intéressent semblent aptes à croître sur une très large gamme de sol. La canne à sucre est exploitée sur des sols difficiles, comme les sols vertiques² (Antilles, bassin du Nil...) ou les sols sulfatés acides d'Australie³. Watanabe et al. (2006) mentionnent

¹ L'impact écologique est surtout marqué lors de la plantation (travail du sol, plantation, risques liés aux 3 mois nécessaires à la fermeture du couvert à partir de boutures : érosion, pertes d'azote, désherbages multiples...). L'empreinte écologique est ensuite plus faible car la couverture en repousse ne demande que 2 mois. L'impact de départ s'amortit sur 5 à 6 repousses, et beaucoup plus pour des systèmes conservateurs et les cannes fibreuses.

² Il semble que la densité racinaire soit un facteur important d'adaptation important à ces sols dans le transfert hydrique est inexistant. Les sorghos de décrue sont ainsi caractérisés par un chevelu racinaire considérable.

³ Sols largement répandus le long dans la zone cannière du Queensland, entre Cairns et Brisbane.

des cultures de *Miscanthus sinensis* sur des sols sulfatés acide du Japon. Les auteurs montrent en culture hydroponique que la Poacée développe des mécanismes qui l'adapte parfaitement aux toxicités ferriques et aluminiques propres à ces sols. La canne à sucre supporte très bien la toxicité aluminique. La rentabilité du chaulage sur les sols acides réunionnais s'explique non pas par la présence d' Al^{3+} mais par des niveaux insuffisants en calcium et magnésium. Notons cependant une sensibilité aux nématodes sur sols sableux (Australie) qui impose des rotations.

Les besoins minéraux de la culture sont proportionnels à la production, donc importants. Ils sont cependant faibles par unité de matière sèche produite, notamment pour l'azote. En dehors de la floraison et de la production de graine, la culture est en effet pauvre en protéines. Des possibilités de fixations symbiotique d'azote atmosphérique par des bactéries endophytiques de la canne à sucre (*Gluconacetobacter diazotrophicus*), sont mentionnées par de nombreux auteurs, mais encore peu exploitées par l'agronome (Pouzet et Lejars, 2008). L'identification du protéome de ces bactéries fixatrices est en cours au Brésil (Levy et al. 2008).

Des caractéristiques agronomiques intéressantes existent dans le complexe *Saccharum* pour étendre encore l'adaptabilité de la culture à des environnements marginaux. Ainsi, *Erianthus arundinaceus*, outre son aptitude à la repousse et sa résistance aux maladies, peut apporter des caractères de tolérance à la fois à la sécheresse mais aussi à l'anoxie liée à l'excès d'eau (*water logging*) (Berding et Roach, 1987). Les possibilités d'introgresion de *E. arundinaceus* dans le génome de *Saccharum* sp., ont été démontrées par Cai et al. (2005).

La variabilité de la tolérance aux faibles températures déjà évoquée (Ch.I-§11) est d'autant plus étonnante que les plantes en C4 sont réputées plus sensible au froid que les plantes en C3.

Nous retiendrons parmi les caractéristiques de la canne à sucre, extrapolables aux autres Poacées pérennes :

- La faible technicité requise pour sa culture ;
- Le faible niveau de risque de production inhérent aux productions végétatives¹ ;
- La faible empreinte environnementale dans les zones adaptées aux besoins hydriques² ;
- Rusticité importante avec un potentiel d'adaptation pédoclimatique encore peu exploité.

Les connaissances acquises par le CIRAD en matière d'itinéraires cannières et fourragers constituent des bases exploitables pour élaborer des bilan carbone de la partie culture des filière (sucre, fibre, élevage...), avec les principaux niveaux d'intensification et les grandes zones pédoclimatiques de production.

142. Approche économique

La fibre de canne à sucre est d'autant plus intéressante à valoriser qu'il s'agit d'une ressource à bas prix, largement disponible dans de nombreux pays tropicaux.

¹ Résistante aux cyclones, production végétative non soumise aux risques inhérents aux phases de floraison / fructification. Risque d'enherbement et d'érosion limité en repousse.

² Pour les zones disposant d'une pluviosité suffisante (pus de 1000 à 1200 mm/an). En zone irriguée la grande efficacité de l'eau propre aux plantes en C4 peut la rendre concurrentielle. Pour des zones plus sèches, le sorgho devient concurrentiel, mais présente l'inconvénient d'une culture à semer après chaque récolte, ou d'une pérennité courte (2 à 3 coupes) probable. Il en résulte pour le sorgho, des contraintes de technicité et des conséquences économiques et environnementales négatives.

Pour [Satyanarayana et al. \(2008\)](#), la production annuelle mondiale de bagasse est de 54 millions de tonnes de matières sèches. Les estimations de [Kiesewetter et Hoppesteijn \(2006\)](#) sont assez comparables, avec 58 millions de tonnes de bagasse à 50 % d'humidité après prélèvement des besoins thermiques des usines. La production mondiale résiduelle de bagasse, après l'usage thermique est donc considérable. Elle intéresse plus particulièrement les pays tropicaux, cible principale des activités scientifiques du CIRAD.

Le marché du sucre est fluctuant du fait notamment :

- Des processus en cours de mondialisation des marchés ;
- Des conflits d'intérêt autour des usages des surfaces agricoles ; et
- Du poids des choix Brésiliens entre le sucre et l'éthanol.

Il devient donc vital, dans les régions où la culture se maintient grâce aux subventions, de mieux valoriser les déchets de la filière. La valorisation des fibres entre dans ce processus.

La fibre de canne à sucre fait l'objet de nombreux usages textiles sous des formes de matériaux non-tissés. La fibre de bagasse permet de fabriquer des biomatériaux : géotextile, panneau de particule¹, carton et papier... Certains usages reposent sur la fibre brute issue d'un traitement mécanique plus ou moins élaboré. D'autres impliquent des traitements chimiques qui permettent de séparer tout ou partie de l'hémicellulose et de la lignine des fibres celluloses ([Ch.V-§1](#)).

L'usage de la fibre de canne à sucre va dépendre de sa composition chimique, de l'arrangement des composants chimiques entre eux et de leur organisation dans la plante ([Ch.II](#)). La répartition des composantes lignocellulosiques varie dans la plante et au cours de la croissance. Cette variabilité est intéressante dans la mesure où elle est exploitable par l'agronome à travers l'itinéraire technique et la sélection. Elle est aussi exploitable pour répondre aux normes de qualité imposées par l'industrie.

L'extraction des fibres celluloses s'accompagne de coproduits valorisables qui sont principalement des dérivés chimiques des lignines et des l'hémicelluloses. Ces dérivés jouent un rôle essentiel dans l'économie des filières fibre. [Venter et Klashorst \(1992\)](#) considèrent que les co-produits issus de l'extraction de la cellulose de la canne à sucre par la réduction en pâte² (*pulping*) ([Ch.V-§524](#)), doublent quasiment le résultat économique de la filière.

Les recherches sur les usages textiles de la fibre n'excluent donc pas les autres usages énergétiques ou chimiques. Si l'utilisation de la fibre oriente une partie des recherches vers les problèmes de qualification technologique de la production, tous les usages sont concernés par la composition chimique de la fibre. **La connaissance du déterminisme génétique et environnemental de la synthèse des composantes de la fibre est essentielle. Le champ des recherches axées sur la durabilité des systèmes de culture est donc vaste.**

¹ Les fibres provenant de résidus de production agricole sont réputées de moindre qualité que les fibres des ligneux. Elles ont donc été souvent utilisées en mélange avec ces dernières (10 à 20 % du poids sans modification notable des caractéristiques). Les progrès technologiques permettent aujourd'hui de les employer seules. Elles constituent un facteur important de préservation des forêts.

² Procédé industriel le plus courant de délignification qui produit par des voies thermomécaniques et chimiques des fibres sous forme de pâtes.

2. La production fibreuse de la filière sucrière

21. La bagasse

La bagasse est la principale source de fibre de la culture de canne à sucre. Le rendement en bagasse est lié à la variété et aux conditions de culture. Les normes généralement adoptées dans les statistiques brésiliennes correspondent à 250 kg de bagasse à 50 % d'humidité par tonne de tige commerciale¹ (tc). Cinquante pourcent de cette production couvre les besoins énergétiques des procédés industriels (sucrierie, distillerie).



Récolte manuelle avec dépaillage (Marie-Galante)



Récolte manuelle sans dépaillage (Réunion)

Photo 5 : Modalités de récolte et gestion de la biomasse

En Inde, [Sharma et al. \(2000\)](#) estiment qu'une tonne de canne usinée produit entre 300 et 350 kg de bagasse avec 50 à 55 % d'humidité. Une synthèse bibliographique de [Kessari et Langellier, \(2005\)](#) fait état d'une production moyenne de 270 kg/tc, avec une fourchette de variation « locale » de 250 à 300 kg/tc.

L'excédent de bagasse après satisfaction des besoins énergétiques des usines était estimé à 65 kg de bagasse par tonne de canne par [Hugo \(1967\)](#). Ces chiffres sont antérieurs aux nombreuses améliorations du rendement énergétique des turbogénérateurs². L'excédent moyen de bagasse disponible pour la fibre est aujourd'hui compris entre 80 et 100 kg/tc pour une installation énergétique performante ([Kessari et Langellier, 2005](#)). Les chiffres brésiliens correspondent à 50 % de la bagasse produite soit 125 kg/tc.

La production de bagasse varie donc selon les sources. Cette variabilité s'explique par les aspects variétaux. Elle dépend aussi largement de la quantité de feuilles récoltées avec les tiges, c'est-à-dire de la modalité de récolte.

On retiendra que, dans le cadre le plus fréquent d'une filière sucre moderne, la ressource en bagasse à 50 % d'humidité disponible pour la fibre correspond à 10 % de la production de tiges usinables.

¹ La notion de tige usinable provient de l'industrie sucrière. Il s'agit de la tige fraîche (environ 70 % d'humidité) effeuillée, amputée de sa partie supérieure, (le fouet) et coupée le plus possible à la base de la souche (partie la plus riche en sucre). Il s'agit donc d'une évaluation commerciale en relation approximative avec le rendement en biomasse sèche.

² Accroissement de la pression dans les circuits de vapeur et réduction des pertes enthalpiques par condensation de la vapeur sous vide.

23. La Biomasse résiduelle

231. Production

La biomasse résiduelle produite par la culture de canne à sucre varie en fonction du rendement et des principaux facteurs qui lui sont associés, notamment l'âge de la culture, la variété, les modalités de récolte (*Photo 5*) et des conditions pédoclimatiques.

La biomasse résiduelle est donc difficile à estimer. Les sources bibliographiques consultées, montrent cependant que cette partie résiduelle de la production représente toujours une fraction inemployée considérable de la production (*Tableau 2*).

Tableau 2 : quelques données sur la biomasse résiduelle d'une culture de canne à sucre

Références	Quantification des résidus	Bases de l'évaluation
Patureau, 1969	40 %	des tiges usinable
Saldago et al. 2001	35 %	de la biomasse aérienne
Pouzet et al. 2002	12 t/ha de MS	100 t/ha de canne
Paillat et al. 1997	20,6 ± 3.3 t/ha MS	93 t/ha de canne, culture mécanisée
Sartori et Leao, 2000	10 t/ha MS	80 t/ha de canne
Viator et al. 2008	6 à 24 t/ha	Climat tempéré de Louisiane
Razafimbelo et al. 2006	14,57 t/ha MS	Moyenne de 5 récoltes consécutives
Saad et al. 2008	140kg MS/t de canne	Moyenne brésilienne. Accessible par récolte mécanique
Luca et al. 2008	13,3 t/ha MS	Moyenne de 3 récoltes consécutives

La biomasse résiduelle est souvent brûlée juste avant la récolte, notamment au Brésil¹ et, plus généralement dans les situations où la récolte se fait manuellement. Les tiges ne brûlent (*Photo 6*) pas du fait d'une hydratation supérieure à 60 %. Elles meurent et deviennent rapidement fermentescibles².

Cette technique de brûlis est de plus en plus décriée. Elle génère des pollutions importantes qui débouchent sur des pathologies respiratoires démontrées ([Arbex et al. 2000](#)) et sur des pertes économiques pour les ménages ([Uriarte et al. 2009](#)). L'état de São Paulo le plus touché par la pollution a légiféré pour interdire les brûlis à partir de 2014³. On estime qu'actuellement près de 50 % de la canne à sucre de l'état est récolté mécaniquement.

232. Composition

Les tiges usinables, source de bagasse, représentent approximativement 50 % de la matière sèche totale produite par la culture ([Dillewijn, 1960](#)). Le reste correspond à la biomasse résiduelle ou paille (*straw*). Une production moyenne de 100 t/ha/an de tiges usinables dans les conditions de culture d'Hawaii met en jeu 61 t/ha/an de matière sèche dont plus de 55 t en aérien et près de 8 t sous forme de racine (*Figure 2*).

¹ En culture irriguée en zone sèche, elle ne se décompose pas d'une année sur l'autre. Elle ne peut être enfouie qu'à la replantation soit une fois tous les 5 ou 6 ans. Le reste du temps, elle est brûlée. Elle est aussi généralement brûlée en cas de récolte manuelle pour faciliter le travail des coupeurs.

² Les cannes brûlées doivent être usinées dans les 24 heures. Au-delà, les pertes en sucres deviennent très importantes. Leur livraison est prioritaire en cas d'incendie accidentel.

³ Le délai est destiné à faire face à la nécessité d'une récolte mécanique et aux effets collatéraux sur la main d'œuvre employée aujourd'hui pour couper la canne à sucre (brûlis obligatoire en coupe manuelle).

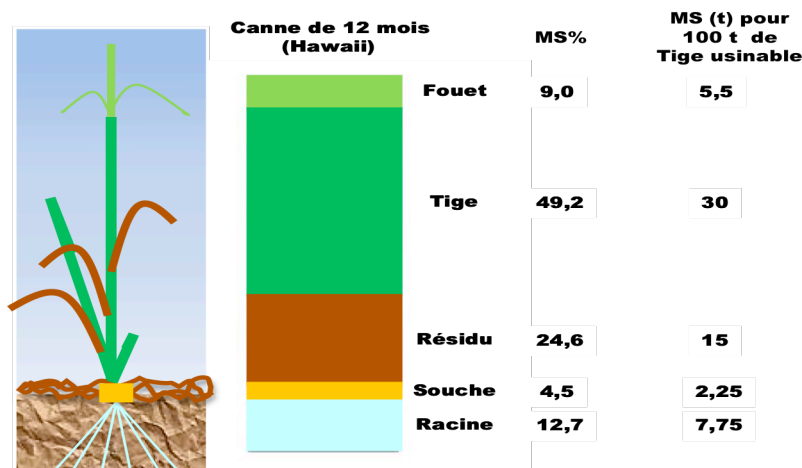


Figure 2 : Allocation de la biomasse cannière d'après Dillewijn, 1960

La biomasse résiduelle, aussi qualifiée de « non-canne » représente, si l'on se base sur l'exemple hawaïen, environ 34 % de la matière sèche aérienne produite par la culture. Elle est constituée :

- Des feuilles vertes et les limbes, plus ou moins adhérent à la tige selon les cultivars ;
- Des fouets¹, délaissés par l'industrie sucrière. Pauvre en sucre cristallisable et très hydratés, ils contribuent à diluer les jus d'extraction et diminuent ainsi le rendement industriel; et
- Des talles² et feuilles mortes laissées au sol.

A noter que le fouet n'est pas une partie parfaitement identifiée de la tige. Il est déterminé par une hauteur d'écimage en récolte mécanique. Il est défini « à l'œil » par les coupeurs. Lors des échantillonnages agronomiques, le fouet est délimité par la zone de rupture lorsque l'on plie la partie haute de la tige³.

On retrouve de plus dans la biomasse résiduelle une fraction souvent importante de tiges usinables lorsque la récolte est mécanisée. Ces pertes à la récolte représentent 5 à 7 % de la production de tige usinable si la récolte est bien maîtrisée (hauteur et vitesse de coupe) et si la verse n'affecte pas trop le couvert. Dans le cas fréquent d'usage inapproprié de la récolteuse, les pertes en tiges usinables peuvent dépasser 15 % de la production utile⁴. Les études d'Alexander (1985) permettent de mieux détailler la répartition massique des composants résiduels de la culture (Tableau 3). Les fouets représentent environ 13 % de la matière sèche aérienne produite tandis que la part des feuilles s'élève à près de 19 %⁵.

¹ Extrémité sommitale de la plante, très hydratée et pauvre en sucre cristallisable. Aussi appelée **bout blanc** (Réunion) ou **amarre** (Guadeloupe), elle est abandonnée au sol à la récolte par écimage.

² Le tallage de la canne à sucre est surabondant. Il atteint un pic en fin de tallage puis diminue progressivement jusqu'à la récolte du fait de la mortalité de talles surnuméraires qui n'ont pas un accès suffisant à la lumière.

³ J-F. Martiné (modélisation, CIRAD Réunion) a mis au point récemment une méthode plus reproductible d'échantillonnage du fouet. Le fouet débute à la base de la gaine de la quatrième feuille déroulée. La première feuille déroulée, aussi appelée feuille TVD pour *Top visible dewlap* est la plus haute dont la ligule est visible. Le fouet commence donc à la base de la gaine de la 4^{ième} feuille sous TVD.

⁴ Chiffres souvent mentionnés en Guadeloupe où la production relève de petites exploitations pluriactives caractérisées par une implication limitée du producteur dans la gestion de sa parcelle.

⁵ Estimation par défaut car les premières feuilles tombées, totalement décomposées au sol, ne sont donc pas comptabilisées.

Tableau 3 : Répartitions pondérales de la matière sèche par acre (4046,9 m²)

Partie de la plante	Fouets	Feuilles			Tiges commerciales	Total MS
		Au sol	Attachées	Total		
MS en t/acre	4,5	5,0	1,5	6,5	24,0	35
%	12,9	14,3	4,3	18,6	68,5	100

Des essais de collecte de la biomasse résiduelle ont été développés en Colombie ([Briceño et Torres, 2001](#)) où le brûlis est interdit et la sécheresse ne permet pas une décomposition totale de la paille, qui s'accumule d'une année sur l'autre. Les récoltes sont réalisées avec des récolteuses de fourrage modifiées de type Class®, qui hachent la paille en tronçons de 2 mm. La biomasse résiduelle collectée contient une grande proportion de fouets (50 %), 30 % de feuilles, 1 % de souche et de racines, 3 % de talles mortes 6 % de jeunes talles¹ (*suckers*) et 10 % de gaines et de sol.

La caractérisation de variétés colombiennes mises en collection pour l'élevage ([Rincón Castillo, 2005](#)) donnent des informations complémentaires sur la composition des résidus. Les feuilles sèches représentent :

- Entre 37,5 à 48,4 % du rendement en canne en première année ; et
- Entre 40,4 à 46,3 % du rendement en repousse.

Les auteurs observent en outre des différences significatives de production entre les 10 variétés testées sur deux sites.

Les différences de répartition de la biomasse aérienne entre fouet, résidus et tige est importante. Ainsi, les fouets représentent 10,9 % de la biomasse aérienne sèche pour [Alexander \(1985\)](#), 12,9 % pour [Dillewijn \(1960\)](#) et 23 % pour [Gooding \(1982\)](#). Ce dernier chiffre est artificiellement élevé car il ne comptabilise pas la biomasse sèche résiduelle dans le total de la biomasse aérienne.

Ces différences montrent que seule une estimation dans les conditions de culture réelles peut conduire à une bonne évaluation des potentialités locales.

233. Intérêt pour la fibre

[Gooding \(1982\)](#) a évalué la composition moyenne de la biomasse résiduelle dans les conditions de culture de Barbade ([Tableau 4](#)). L'auteur montre que les fouets et les feuilles sont beaucoup plus riches en fibre que les tiges. La teneur en sucre des fouets est loin d'être négligeable, mais elle caractérise surtout des sucres non cristallisables².

Les feuilles sont également riches en fibre. La biomasse résiduelle peut donc représenter une source de fibre intéressante.

Tableau 4 : Composition moyenne de la biomasse cannière

Partie	Répartition pondérale en % plante totale (MS)	Teneur en %		
		Fibre	Sucre	MS
Tige	72	15	16,6	31,6
Fouet	23	25	11,0	36,0
Résidu	5	30		30,0

Les fouets sont souvent collectés manuellement comme appoint alimentaire pour l'élevage traditionnel des ruminants « au piquet » en saison sèche. Leurs qualités alimentaires sont

¹ Dénommé **baba** à La Réunion.

² Seul le saccharose est cristallisable. Les autres sucres forment des masses amorphes (sirop) à l'extraction. On les retrouve dans la mélasse.

excellentes (Geoffroy et Vivier, 1975). Il s'agit de la partie de la canne à sucre qui présente la meilleure digestibilité. Or, la digestibilité des graminées fourragères est liée de manière négative aux teneurs en composés phénoliques (acides phénoliques et polyphénols) de la fibre (Riboulet et al. 2008). L'aptitude biologique du rumen des animaux à extraire les celluloses et hémicelluloses alimentaires des lignines et acides phénoliques associés est faible (Ch.III-§4). Ces mêmes composés phénoliques doivent être extraits des fibres par des voies physicochimiques onéreuses et polluantes, pour les principaux usages industriels de la fibre de canne à sucre (Ch.V). On peut donc penser que les fouets constituent une source de fibre industrielle de meilleure qualité que la bagasse.

Le fouet est donc une partie intéressante de la plante. Son trier parmi les différentes composantes de la biomasse résiduelle pourrait être une opportunité économique de valorisation de la fibre en complément de celle de la bagasse.

La caractérisation fine du contenu en fibre des fouets et de la composition en dérivés phénoliques de ces fibres sont des axes de recherche à développer dans le cadre d'une amélioration économique de la production. La caractérisation des fibres des feuilles est aussi un domaine novateur, d'autant que l'on peut supposer que ces organes disposent de fibres plus longues que celles des tiges et surtout des tiges broyées.

Les problématiques économiques et environnementales de collecte des résidus de culture de la canne à sucre ne sont pas reprises car déjà abordées (Pouzet et Lejars, 2008).



Exportation des fouets (Marie-Galante)



Coupe manuelle après brûlis (Sénégal)



Pâturage (Marie-Galante)

Photo 6 : Quelques modalités de gestion de la biomasse résiduelle

234. Conséquences agronomiques de l'exportation des pailles

La biomasse résiduelle est brûlée, laissée à une décomposition aléatoire au sol ou exportée (Photo 6). Les effets agronomiques qui résultent de son élimination par exportation ou brûlis sont discutables et peuvent s'opposer à une valorisation économique potentielle intéressante. Nous avons donc conduit une étude bibliographique sur le bilan agronomique de la gestion de la biomasse résiduelle de la canne à sucre (Pouzet et Lejars, 2008) que nous résumons ici.

Les principales conséquences de l'exportation de la biomasse résiduelle de la canne à sucre sont :

- Un accroissement du risque d'érosion limité cependant par la présence au sol d'un tapis de biomasse résiduel. La collecte totale de la biomasse résiduelle n'est pas réalisable sans un prélèvement important de sol. Des essais de récolte mécanisée avec une presse à haute densité (Hassuani et al. 2005) montrent que la collecte contient au moins 3 % de terre alors qu'elle laisse entre 15 et 45 % de la production

au sol (**Tableau 5**). La pollution de la biomasse par le sol a des conséquences négatives importantes pour toutes les filières utilisant la fibre. Elle doit donc être limitée¹ ;

- Un effet limité sur l'enherbement, car l'efficacité « herbicide » de la couverture impose des conditions atteintes de manière exceptionnelles :
 - De répartition régulière des résidus au sol ; et
 - De plus de 15 t/ha de matière sèche ;
- Un effet allélopathique (**Ch.III-§432-a**) conservé du fait de la présence au cours du cycle d'un paillis de feuilles sénescents, et de l'existence d'un tapis de biomasse non collectable après la récolte ;
- Un effet peu perceptible sur le statut organique du sol. Le stock constitué au fil des coupes est réel, mais il est « brûlé » par le labour à chaque replantation (tous les 5 ou 6 ans). La « durabilité » étonnante de la monoculture avec brûlis est surtout liée aux racines. Le couvert cannier produit annuellement² *in situ* une biomasse organique de 5 à 10 t/ha de matière sèche racinaire qui se décompose dans le profil ;
- Un effet positif très marqué sur la levée et le rendement, dans les conditions thermiques de culture du sud des USA (**Viator et al. 2009**) avec notamment un effet auto toxique des molécules libérées par les résidus pouvant réduire la levée de 30% ;
- Un effet positif sur la vitesse de reprise de la culture après la coupe. Le paillis important diminue en effet la levée et la vitesse de couverture. Il peut de plus imposer des techniques culturales supplémentaires d'ouverture des lignes de plantation ;
- Un bilan minéral négatif lié à l'exportation avec les résidus d'éléments importants dont le phosphore, le calcium et le magnésium. Une compensation par des apports minéraux doit être envisagée.

Les spécialistes considèrent généralement que l'exportation de 80 % de la biomasse produite n'a qu'un effet négligeable sur l'état du sol (**Gressel, 2008**). Ces chiffres sont à rapprocher des données de **Macebo et al. (2003)**, qui estiment que les brûlis canniers épargnent en moyenne 20 % la biomasse résiduelle. De même, la récolte mécanique de la biomasse au sol n'autorise que des prélèvements de l'ordre de 60 à 70 % (**Tableau 5**) avec une quantité acceptable de terre récoltée (**Hassuani et al. 2005**).

Tableau 5 : Récolte de la biomasse résiduelle avec une presse haute densité au Brésil

Résultats	Ratissage préalable		
	1 rang	2 rangs	Sans
Poids moyen des balles en kg	242	306	295
% De sol	3,5	4,7	3,3
% Collecté	56	84	73

Ces conclusions tempèrent largement les a priori classiques sur le caractère incontournable de la restitution de la biomasse résiduelle dans le cadre d'une bonne gestion agronomique³. Elles soulignent également la nécessité d'encadrer, par une recherche adaptée, les projets visant à utiliser la biomasse résiduelle à des fins économiques. L'exportation de la biomasse résiduelle tend en effet à se généraliser aujourd'hui. Le Brésil en est un exemple d'actualité. L'usage envisagé de la bagasse comme source de sucre fermentescible pour l'éthanol de

¹ Rendement énergétique diminué, usure mécanique lié à la silice, coloration des pulpes lors du défibrage...

² La plupart des auteurs considèrent que le système racinaire de la canne à sucre se renouvelle entière après la récolte. Les anciennes racines meurent progressivement pour être remplacées par des nouvelles racines issues des *primordia* de la souche.

³ Le débat écologique autour de cette problématique ne prend pas en compte la valeur économique des résidus qui sont abandonnés à des conditions aléatoires de décomposition. Cette décomposition perturbe de plus l'alimentation azotée de la culture et le bilan carbone du système.

seconde génération conduit à un déficit énergétique structurel. Le rééquilibrage énergétique envisagé repose sur l'utilisation de la biomasse résiduelle en complément des lignines extraites lors des processus de saccharification¹.

On peut se demander si l'utilisation de la biomasse résiduelle à des fins autres qu'énergétiques (fibre, chimie verte...) ne constituerait pas une alternative économique intéressante. Ces problématiques ouvrent à des orientations des recherches notamment économiques sur l'optimisation de la valorisation des différentes composantes de la production.

Des études complémentaires sont donc nécessaires pour adapter confirmer ou infirmer ces conclusions en fonction du contexte de production. Une évaluation de l'impact économique et environnemental reste à faire dans les situations de production, en fonction de la valeur économique attribuable à la biomasse résiduelle. Dans des situations comme l'Ile de La Réunion, où la collecte de la biomasse résiduelle est économiquement intéressante², l'impact de ces exportations n'apparaît plus comme une problématique prioritaire.

Un autre domaine d'étude à développer concerne la qualification des fibres issues de la biomasse résiduelle. Quelques éléments de variabilité sont à prendre en compte :

- Les feuilles mortes, contrairement aux feuilles vertes, subissent des altérations liées à une décomposition plus ou moins prononcée au sol. Des systèmes enzymatiques complexes des microorganismes peuvent en effet, selon les conditions de milieu, dégrader les lignines en utilisant l'énergie contenue dans les hémicelluloses ;
- Certains cultivars³ ont des gaines adhérentes à la tige. Les feuilles mortes demeurent ainsi fixées à la plante et ne se décomposent pas au sol. D'autres cultivars ont des feuilles qui se détachent et tombent au sol dès qu'elles sont sénescentes. Si les cultivars à feuilles caduques sont favorables au sucre, les autres devraient être plus intéressants pour la fibre en limitant les phénomènes d'altération.

Le volume respectif des composantes mortes et vertes de la biomasse résiduelle dépend des modalités de récoltes.

3. Les potentialités de production de fibre

31. Stratégie de production

Si les conditions économiques ne sont pas favorables au sucre ou si elles s'avèrent favorables à l'usage des fibres, on peut envisager des systèmes dont la production principale est la fibre. Il est alors possible par une sélection spécifique et des itinéraires techniques adaptés, d'accroître de manière importante et rapide la production quantitative et qualitative de fibre.

Il peut aussi être envisagé de maintenir la production de fibre en dehors de la période de production de bagasse en cultivant sur des surfaces appropriées des espèces fibreuses sans intérêt pour le sucre.

Il est enfin possible de concevoir des filières mixtes « sucre fibre ». La contrainte principale

¹ Transformation des polymères glucidiques en sucre.

² Source de carbone pour l'élevage (alimentation, litières, épuration des effluents organiques).

³ Exemple des cultivars réunionnais R570 (feuilles adhérentes) et R579 (feuilles sessiles)

sera d'assurer un stockage de la bagasse, dimensionné au fonctionnement continu des précédés industriels. Cette option peut impliquer un choix variétal approprié pour accroître la production de bagasse.

32. Les choix variétaux

321. Les antagonismes sucre - fibre

Les informations économiques reposent sur la filière sucre dont la fibre est un co-production ou un sous-production. Or, il existe un antagonisme entre la production de sucre et celle de fibre. Elle est quantifiée sous forme d'une corrélation fortement négative (entre -0.65 et -0.76 selon les auteurs) entre la teneur en saccharose et la teneur en fibre (Sunil et Lawrence, 1996; Jackson, 1994; Brown et al. 1969).

Singel et al. (2005) montrent que le rendement photosynthétique de la culture est élevé en début de cycle lorsque le carbone fixé élabore surtout de la fibre. Il diminue dès que l'accumulation de sucre devient importante.

L'accumulation d'hexose dans les feuilles inhibe la photosynthèse par un processus de régulation (*down-regulation*) (McCormick et al. 2006 ; McCormick et al. 2007 ; McCormick et al. 2008). Il existe une corrélation négative entre l'expression d'une hexokinase et le rendement photosynthétique, qui est associée à la diminution de la concentration d'hexose dans la feuille. Les hexoses apparaissent comme des régulateurs génériques de la photosynthèse. Leur rôle décrit pour la canne à sucre est en effet mentionné chez d'autres espèces comme *Spinacea oleracea* (Krapp et al. 1991), *Amaranthus edulis* (Bleichschmidt-Schneider et al. 1989) ou *Coffea arabica* (Frank et al. 2006). Ces mêmes hexoses interviennent aussi dans la régulation de la germination (Dekkers et al. 2004).

Dans une expérience en milieu contrôlé, Inman-Bamber et al. (2008) montrent de manière inverse, que la réduction artificielle de la croissance de la canne à sucre par une alimentation hydrique limitée, réduit la demande de la plante en photo-assimilat. Il en résulte une accumulation de sucrose¹ dans la feuille avec une différence variétale importante et exploitable. Les auteurs utilisent une méthodologie expérimentale très sophistiquée (phytotron, chambre de mesure des échanges gazeux...) pour contrôler la photosynthèse. Les analyses du saccharose sont réalisées par HPLC après conservation des échantillons dans l'azote liquide. Elles portent sur le contenu dans les tiges et pour l'ensemble des pots de culture.

L'accroissement de la production de sucre conduit de fait à une production plus pauvre en fibre. Ce même accroissement conduit aussi à une production de biomasse plus hydratée (Martiné et Lebreton, 2001).

L'amélioration de la production de fibre met en jeu des stratégies agronomiques et génétiques :

- Agronomiques pour retarder la production de sucre (Alexander, 1985) ; et
- Génétiques pour utiliser la variabilité naturelle de teneur en fibre et diminuer la teneur en sucre.

Ces stratégies impliquent de meilleures connaissances (1) de l'allocation au cours du cycle, du carbone vers les principaux constituants de la biomasse et (2) de l'impact de la production de sucre sur ces allocations. La comparaison d'une Poacée fibreuse avec la canne à sucre est particulièrement pertinente dans ce type d'étude pour mieux

¹ Terme industriel anglo-saxon, aussi employé en français, qui désigne le saccharose

comprendre les mécanismes mis en jeu.

Le différentiel de teneur en hexose des limbes, en début et en fin d'activité photosynthétique journalière, pourrait être un bon indicateur d'état de la culture et de la variété. Cet indicateur pourrait servir aux agronomes et aux sélectionneurs pour caractériser le potentiel photosynthétique du couvert ou classer les seedling. Il serait aussi intéressant de suivre l'évolution de cet indicateur au cours du cycle en comparant la canne à sucre à des Poacées fibreuses.

L'orientation des recherches à développer dans ce cadre portent donc :

- **Sur la recherche d'une méthodologie simple pour mesurer le sucre dans les limbes (tiges ?) ; et**
- **Sur l'étude des relations entre le niveau de sucre dans les limbes (tiges ?) et la croissance du couvert.**

Les possibilités de doser facilement le sucre dans les limbes ou dans les entrenœuds sont à inventorier : polarimètre, NIRS portable... Il existe des dispositifs portables permettant de doser le saccharose au champ (Kennedy *et al.* 2007) qui pourraient être testés.

L'amélioration de la production de la canne à sucre, pour le sucre, s'oriente, notamment en Australie vers une modification de l'architecture des plantes (Pribil *et al.* 2007). Il s'agit :

- De réduire la taille des plantes pour diminuer la verse :
- De réduire l'activité des bourgeons axillaires ; et
- De mieux contrôler le développement des rejets tardifs appelés aussi baba (*sucker*).

Les babas sont des repousses tardives pauvres en sucre, qui apparaissent en fin de cycle (10 à 12 mois). Ils représentent une biomasse souvent importante estimée dans certaines conditions défavorables à 40 % de la récolte. Leur présence occasionne d'importantes pertes en sucre au niveau de l'usine. Ces « babas » constitués de tissus jeunes et donc à priori peu lignifiés pourraient constituer, comme les fouets, une source intéressante de fibres de qualité.

La production de repousses tardives relève d'interactions entre les variétés et l'environnement. Il est favorisé par la lumière, l'humidité et l'azote (Berding *et al.* 2005). Il est souvent déclenché par la verse du couvert (*lodging*).

Le choix agronomique des cultivars et de la fertilisation azoté permettrait donc de favoriser le développement des babas, si ceux-ci s'avèrent intéressant pour la fibre.

La production de fibre pourrait conduire à des architectures de plantes opposées : très fort tallage, tiges très hautes résistantes naturellement à la verse du fait des fortes teneurs en fibre, forte production de babas.

322. L'amélioration variétale

Le patrimoine génétique « fibre » de la canne à sucre n'a que peu intéressé une recherche quasi entièrement dédiée au sucre (Pouzet et Lejars, 2008). Quelques études anciennes ont souligné les potentialités considérables de production de fibre et de production mixte sucre et fibre de la canne à sucre (Alexander, 1979 ; Alexander, 1985 ; Clarke et Giamalva, 1986 ; Clarke et Keenlside, 1986). Les aléas économiques des crises pétrolières n'ont jamais permis de développer les procédés industriels adaptés à ces nouvelles productions. L'usage industriel des fibres a été par ailleurs peu exploré, ce qui limite encore aujourd'hui les possibilités de valorisation économique de la culture.

Tableau 6 : Performance agronomique d'un hybride sélectionné pour la fibre en Floride

Rendement/composition (moyenne 5 récoltes)		Canne à sucre élite CP65-357	Hybride fibreux SP79-1002
Rendement t/ha	Biomasse aérienne	58	212
	Tiges usinables	50	169
Composition en % de tige usinable	Fibre	13,4	28,0
	Soluble	16,2	11,1
	Saccharose	14,0	8,4
	Monosaccharides	0,6	1,2
Biomasse aérienne d'une canne (kg)		1,17	0,59
Hauteur moyenne d'une canne (m)		2,2	3,3
Sucre théorique (t/ha)		7	14,2
Fibre théorique (t/ha)		6,7	47,3

Les travaux génétiques de [Clarke et Giamalva \(1986\)](#) et de [Clarke et Keenlislade \(1986\)](#) sont exemplaires d'une problématique sucre *versus* fibre ([Tableau 6](#)). Les auteurs montrent qu'il est possible d'accroître simultanément les productions totales de sucre et de fibre mais que le résultat n'est pas adapté aux filières sucre. L'un des hybrides créés en Floride a produit pendant 5 ans 3,6 fois plus de biomasse aérienne dont 2 fois plus de sucre et 7 fois plus de fibre que la canne à sucre de référence.

Les indications biométriques montrent que les tiges de la variété fibreuse sont beaucoup plus nombreuses, plus fines et plus hautes que celles de la variété sucrière. Cet hybride ne répond cependant pas aux contraintes de l'industrie sucrière du fait de la forte dilution du sucre et des problèmes de broyage.

Les stratégies d'amélioration de la teneur en fibre de la canne à sucre sont basées aujourd'hui sur l'amélioration génétique traditionnelle. Elles mettent en jeu des croisements interspécifiques réalisés à l'intérieur du complexe *Saccharum*. Le caractère « fibre » est apporté le plus souvent par le *Saccharum spontaneum*.

La Barbade dispose actuellement dans son catalogue, de cannes à usages multiples fibre et sucre (*multipurpose*) et de cannes fibreuses (*cane fuel*). Ce matériel végétal novateur par rapport à la canne à sucre provient de sélections débutées dans les années 2000. Le matériel en sélection était constitué d'hybrides inter-spécifiques créés dans les années 60 par le WICSCBS¹ ([Rao, 2007](#) ; [Rao et Albert-Thenet, 2005](#) ; [Albert-Thenet et Rao, 2005](#) ; [Rao et Kennedy, 2004](#)).

Les variétés fibreuses et multipurpose de Barbade ont été diffusées en vue de leur sélection multilocale par le réseau WISBEN², notamment en Guyana et à Belize. L'intérêt pour une meilleure production de biomasse non sucre dans la région repose sur des stratégies de production d'énergie renouvelable et non de fibre. Ce matériel a été aussi importé à l'île Maurice par le MSIRI. Nous avons l'autorisation de Barbade de le tester en Guadeloupe. Des tests à La Réunion sont aussi envisagés.

Les recherches sur les cannes fibreuses mettent en évidence une augmentation de la durée de vie de la culture de plusieurs années par rapport à celle des cannes à sucre ([Deboer, 2007](#)). Cette caractéristique positive pour l'économie et l'environnement est à rapprocher des caractéristiques d'adaptation au stress environnemental et de capacité de tallage du parent *S. spontaneum* ([Wang et al. 2008](#) ; [Foreman et al. 2007](#)).

Les techniques usuelles d'améliorations variétales, développées notamment par Barbade, sont longues, coûteuses et difficiles. Il faut comme pour le sucre, une dizaine d'année pour créer une nouvelle variété. L'hybridation se heurte de plus à des floraisons limitées voir

¹ West Indies Central Sugar Cane Breeding Station.

² West Indies Sugar Breeding Experimental Network.

inexistantes, tandis que le pollen est peu fertile et de conservation très délicate et de toute manière limité dans le temps (*Ch.II-§14*).

La reproduction végétative des Poacées en C4 qui nous intéressent et la très faible occurrence de croisements sexués entre cultivar du complexe *Saccharum* (*Ch.II-§14*) en font de bon candidat pour les techniques génétiques de précision¹. Les méthodes d'introduction ou de suppression d'un nombre limité de gènes intervenant dans un processus ciblé du métabolisme de la plante commencent à donner des résultats chez les monocotylédones et la canne à sucre (*Lakshmanan et al. 2005*). Les résultats obtenus sont prometteurs dans de nombreux domaines : résistance aux insectes, aux pathogènes, aux herbicides, aux virus... La synthèse de produits à forte valeur ajoutée dans le cadre de bioraffinage devient envisageable (*Brumbley et al. 2007*).

Dans une synthèse bibliographique récente, *Gressel (2008)* souligne que la transgénèse est devenue une technique incontournable pour développer les biocarburants². Le premier objectif est de diminuer la teneur en lignine dont la présence, même à très faible dose, empêche la biodégradation des polymères glucidiques en sucre fermentescible. Les lignines interfèrent en effet, par leurs configurations spatiales, avec les carbohydrase.

L'amélioration de la qualité et de la production de fibre de canne à sucre repose aussi beaucoup sur les régulations de la synthèse des lignines (*Ch.III-§432*) :

- Si on prend l'exemple du modèle des Poacées en C4 que constitue le maïs, l'ennemie est la teneur en lignine du fait de sa corrélation négative avec la digestibilité de la paille. Il reste cependant à s'assurer que l'on peut diminuer la lignine sans affecter les qualités agronomiques de la culture (potentiel photosynthétique et rendement, résistance aux agressions externes...).
- Cependant, la valorisation énergétique de la biomasse conduit à rechercher des variétés riches en lignines, qui auront vraisemblablement des qualités agronomiques exceptionnelles (vigueur, résistances aux agresseurs, capacité de tallage, capacité à la repousse...). Ces mêmes variétés présenteront un intérêt lorsque les techniques d'extraction et l'environnement économiques seront plus favorables à la chimie verte et à la valorisation des nombreux phénols issus des lignines.
- Pour la valorisation de la fibre, les usages s'opposent :
 - Dans le cas de la filière papetière, l'accroissement de la teneur en lignine se traduit par une augmentation des coûts éco-environnementaux. Nos objectifs fibre nous orientent donc a priori vers une réduction de la teneur en lignine.
 - Cependant, la fabrication de panneaux de particules à partir des fibres donne de meilleurs résultats à partir de bagasse brute que de bagasse délignifiée.

La recherche d'un modèle de plante pauvre en lignines est d'actualité. Elle répond en effet à des problématiques économiques et environnementales immédiates. Une autre voie est cependant concevable à court terme, pour des usages spécifiques, et à moyen et long terme pour des raisons d'intensification écologiques :

- Le modèle de plante riche en lignine est parfaitement adapté aux usages qui ne nécessitent pas une délignification préalable. Il en est ainsi de la production énergétique à partir de combustion, pour les centrales électriques ou pour produire

¹ Les *Sorghum bicolor* à faculté de repousse déjà évoquée sont a priori exclus de la liste : Ils se multiplient par voie sexuée et sont génétiquement proche de *Sorghum halepense* espèce de mauvaise herbe très agressive (Johnson grass).

² Des cannes à sucre génétiquement modifiées sont en cours d'évaluation **au champ** dans quelques pays (Brésil, Argentine, Australie...). Les principaux objectifs sont aujourd'hui d'accroître le potentiel « éthanol » de la culture.

des gaz de synthèse¹ par gazéification. La lignine est en effet le composant le plus énergétique de la lignocellulose. Il en est de même pour les biomatériaux de type panneaux de particule qui utilisent de la bagasse brute. La lignine est aussi étudiée depuis quelques années comme base à la fabrication de résines phénoliques, en substitution aux résines d'origine pétrochimiques.

- A moyen et long terme, on peut faire l'hypothèse que des progrès technologiques permettront une délignification économiquement moins coûteuse et moins polluante. Une meilleure valorisation du polymère, que son usage comme combustible, est possible. Ses composantes phénoliques pourraient devenir une alternative rentable à la chimie des molécules aromatiques dépendantes actuellement du pétrole.

La recherche d'un accroissement de la teneur en lignine est une voie prometteuse pour améliorer le potentiel photosynthétique et les caractéristiques agronomiques de la culture. Les recherches actuelles laissent espérer qu'un accroissement de la teneur en lignine permette de créer des couverts à haut potentiel photosynthétiques, caractérisés par une croissance rapide et une résistance élevée aux bio-agressions. Ce modèle de plante répond bien à une demande d'intensification écologique. Outre la valorisation de la variabilité naturelle de la teneur en lignine, les actions sur le métabolisme des diterpènes sont très prometteuses dans l'exploration de cette voie (*Ch.III-§43*).

¹ Aussi appelé syngaz : mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène permettant la synthèse de méthane et d'hydrocarbures par procédé Fischer-Tropsch.

II. LA FIBRE DANS LA PLANTE

La fibre de canne à sucre est une fibre de tige comme celle du bambou ou des espèces ligneuses. Les fibres provenant des feuilles de la culture restent à évaluer.

La plupart des connaissances de la structure morphologique des tiges de canne à sucre, qui informent sur la répartition des fibres dans la tige et les feuilles ont été synthétisées par [Van Dillewijn \(1952\)](#) et plus tard par [Clements \(1980\)](#). Rappelons que la canne à sucre, monocotylédone herbacée, diffère des dicotylédones arbustives ou arborescentes par l'absence de cambium. Les fibres sont constituées par des tissus primaires directement issus du méristème apical. La canne à sucre semble cependant souffrir d'une exception à l'absence de formation secondaire caractérisant les monocotylédones ([Ch.II-§21](#)).

1. La tige

11. Caractéristiques

La tige de canne à sucre, d'une longueur pouvant dépasser 4 m, est constituée de nœuds et d'entrenœuds. Leurs caractéristiques, longueur et diamètre dépendent de la variété et de tous les facteurs trophiques (climat, fertilisation, cycle, variété, maladies et parasite, niveau de tallage...). Ces caractéristiques sont donc en partie modulables par l'itinéraire technique. La longueur de l'entrenœud s'accroît très rapidement de la base de la tige jusqu'à l'entrenœud 7 ou 8. Il décroît ensuite jusqu'au sommet de la tige. Le diamètre est le plus grand à la base jusqu'au 7-10^{ème} entrenœud. Il est ensuite constant.

12. Anatomie

121. Constitution des tiges

Les différents tissus que l'on rencontre de la périphérie de la tige à son centre sont les suivants :

- Un épiderme avec une couche cireuse recouvrant une mosaïque des cellules siliceuses courtes et de cellules subéreuses allongées. Leur proportion et disposition sont variétales ;
- Deux rangées de cellules lignifiées qui donnent la résistance à la tige. Les faisceaux libéroligneux de la périphérie sont souvent jointifs et forment un anneau continu ;
- Des faisceaux fibro-vasculaires très denses et petits en périphérie. Leurs nombres diminuent, leurs espacements augmentent et leurs tailles s'accroissent au fur et à mesure que l'on va vers le centre de la tige ([Figure 14](#)).

Cet ensemble est baigné dans un parenchyme vivant, qui assure avec le phloème les fonctions de stockage, notamment des sucres, et de distribution de la sève élaborée ([Dinant, 2008](#)). Ce parenchyme est le constituant principal de la moelle (*pith*) par opposition à l'écorce de la tige (*rind*).

Les faisceaux, qui constituent les fibres, sont en disposition parallèle dans l'entre-nœud. Ces faisceaux se ramifient ou se courbent au niveau des nœuds pour alimenter les feuilles, les *primordia* radiculaires et les bourgeons. Il y a donc à ce niveau une discontinuité qui va jouer sur la longueur des fibres brutes lors de l'extraction. L'intégrité structurale des vaisseaux est assurée par la lamelle moyenne. Cette couche, originellement composée de pectines, se lignifie progressivement en fin de vie des cellules et contribue ainsi à les lier entre elles.

La masse linéaire de fibre est plus élevée à l'extérieur de la tige que dans sa partie centrale. Cette masse linéaire augmente également du sommet de la tige vers sa base. Le phénomène est lié à une augmentation du diamètre du manchon de sclérenchyme vasculaire.

La qualité des fibres est dépendante des conditions extérieures. Le dépaillage artificiel accroît la dureté de l'écorce (résistance à la verse, aux attaques de parasites). L'irrigation la diminue. La verse retarde le durcissement de l'écorce.

Il existe une grande variabilité variétale de dureté des tiges de canne à sucre. Cette dureté est directement liée à la répartition des faisceaux vasculaires, leur nombre et la taille de la gaine sclérenchymateuse entourant le vaisseau. Elle est aussi reliée au taux variable de lignification des cellules intervasculaires. La variabilité de dureté des tiges résultant de ces processus de développement et de lignification est exploitée par la sélection. Elle conduit à des qualités recherchées telles que facilitée de récolte manuelle, usure des pièces coupantes en récolte mécanique, résistance à la verse, résistance aux maladies...

La dureté, directement liée à la teneur en fibre, est beaucoup plus élevée pour le *Saccharum spontaneum* que pour le *Saccharum officinarum*.

122. Conséquences agronomiques

On retiendra pour la production de fibre de tige, que :

- Les caractéristiques physiques et en corollaire la composition chimique des fibres varient avec l'âge des tissus. Elles varient en conséquence en fonction de la position des fibres le long de la tige ;
- Les fibres sont concentrées dans la partie périphérique de la tige, son écorce ;
- Les itinéraires techniques ont une influence sur la qualité des fibres.

La tige de canne à sucre est donc une source hétérogène de fibres dont la qualité et la composition peuvent être modulées par un choix judicieux des techniques de culture. L'extraction des fibres des tiges nécessitera par ailleurs de séparer les parties externes cireuses et les parties centrales parenchymateuses de l'écorce fibreuse (*Ch.IV-§3*).

13. Croissance et floraison

131. Croissance

Il se produit au cours du cycle une augmentation des dépôts de composés ligneux dans les fibres, et autour des fibres. Le phénomène s'intensifie avec l'âge, de la levée à la floraison. Il en résulte un durcissement des fibres au fur et à mesure de la croissance des tiges. Les constituants de la lignocellulose varient ainsi dans la tige de canne à sucre selon l'emplacement et conformément au gradient d'âge des entrenœuds qui croît du sommet à la base de la tige. [Ouensanga \(1989\)](#) note ainsi une diminution de la concentration en lignines et en hémicellulose de la base au sommet des tiges. L'auteur note également un accroissement de la cellulose de la base de la tige à son milieu puis une décroissance du milieu au sommet.

Comme piste de recherche, il serait concevable de développer une méthode d'évaluation simplifiée de la production qualitative et quantitative de fibre au cours du cycle. L'âge des entrenœuds est lié à sa position sur la tige. Les modèles de croissance (Martiné, 2003) inversés¹ devraient permettre d'apporter des informations sur l'âge de chaque entrenœud en fonction des conditions climatiques journalières au cours du cycle. Des mesures de fibre par entrenœud sur une canne adulte pourraient se substituer aux dispositifs expérimentaux classiques de séries chronologiques, très lourds en surface et main d'œuvre. Une telle méthode, même imparfaite, serait bien adaptée à l'évaluation du matériel végétal en collection, qui est disponible en quantité limitée. Une autre possibilité serait de remplacer les séries de mesures chronologiques par une mesure comparative portant sur des sections repérées de la tige (ex : Tiers inférieur, médian et supérieur).

132. Floraison

a. Processus

Au moment de l'induction florale, la formation d'entrenœuds cesse ainsi que l'émission de nouvelles feuilles et la croissance de la tige. L'apex ne fabrique donc plus d'entrenœuds pour le stockage du sucre. La production photosynthétique sert alors à l'élaboration de la fleur. La tige s'enrichit en sucre en partie du fait de la déshydratation progressive des talles. L'arrêt de dominance apicale relance l'activité des bourgeons axillaires qui peuvent former, selon la variété et les conditions climatiques, des pousses sur la tige. La talle fleurit (Photo 7) dépérit et se vide de sa biomasse tandis que la prolifération de nouvelles talles (baba) se traduit par un enrichissement progressif de la biomasse totale en eau et en cellulose.



Sénégal (16°25'40" N ; 15°45'35" W ; 7m)



Guyana (5°52'40"N; 57°10'30"W; 5m)



Marie-Galante (15°53'37"N ; 61°15'33"W ; 147m)

Photo 7 : Variabilité de la floraison de la canne à sucre à la récolte

Parallèlement aux migrations rapides des composantes des cellules vers la souche et les nouvelles talles, on observe une délignification dont le processus est mal connu. Les vaisseaux deviennent alors flasques et l'écorce plus tendre. La floraison est donc une phase critique pour le sucre et la qualité des fibres.

Quelques variétés ont été sélectionnées pour fleurir afin de caler la récolte sur un pic de richesse. Ce type de variété doit cependant être récolté dans un créneau précis qui n'excède pas un mois. Au-delà, le rendement en sucre s'effondre. Dans la grande majorité des cas, la création variétale pour le sucre s'oriente vers des variétés qui ne fleurissent pas.

¹ Le modèle de croissance Mosaic génère des entrenœuds à partir des données climatiques journalières. Il s'agit ici de retrouver la date ou la période de formation de l'entrenœud à partir de la connaissance du climat.

b. Conséquences agronomiques

Les sélectionneurs se sont préoccupés très tôt de l'incidence de la floraison sur le rendement en sucre de la canne.

Dans le cas des cycles Hawaïens de 2 ans, la diminution de rendement par pourcent de cannes fleuries est de 0,308 % la première année. En seconde année, la floraison a peu d'influence sur le rendement (Clements, 1975).

Rao (1977) met en évidence dans les conditions de la Barbade, une relation linéaire entre le pourcentage de floraison et le rendement. Les pertes de rendement sont de 0.47 % par pourcent de floraison en canne plantée. Elles diminuent en repousse avec 0.28 %. Ces chiffres sont expliqués par l'arrêt de croissance des cannes fleuries pendant 5 mois. Il en résulte une diminution moyenne de 16 entrenoeuds de stockage par tige fleurit. L'auteur note aussi la production de biomasse pauvre en sucre par les bourgeons axillaires et la réduction de la moelle des tiges. Des études comparables ont été développées à l'île Maurice, pour améliorer le rendement (Julien et al, 1978).

Singh et al. (1988) montrent qu'une diminution de la floraison de quatre variétés tardives, s'accompagne d'un accroissement des rendements en canne pouvant atteindre 10,5 %, tandis que la production de sucre augmente.

Des travaux conduits en Afrique du Sud en réduisant la floraison par un traitement chimique à l'ethephon®¹ concluent aussi à l'effet dépressif de la floraison sur la production (Humm, 2009).

Berding et Hurney (2005) estiment qu'en Australie, entre les latitudes 2 et 17°, une bonne production implique l'absence de verse et l'absence de floraison. Pour les auteurs, la floraison provoque des pertes de rendement en canne de 6,8 %, une réduction de teneur en sucre de 3 % et une chute de rendement en sucre de 9,4 %.

Ces chiffres variables traduisent le caractère multifactoriel du processus de floraison, ils montrent l'effet dépressif de la floraison sur les productions de tige et de sucre. **Les effets de la floraison sur la production quantitative et qualitative de fibres restent à déterminer.**

L'étude de l'incidence de la floraison sur le rendement n'est pas simple². La méthodologie la plus courante, pour évaluer les effets de la floraison sur la production, met en jeu des variétés plus ou moins florifères dont la floraison est plus ou moins inhibée par des éclairages nocturnes (*night break*). À titre d'exemple, Berding et Hurney (2005) utilisent un éclairage de 40 W pendant 45 minutes pour les cannes plantées (*plant crop*) et de 100W pendant 120 minutes pour les premières et secondes repousses (*ratoon crop*). Quatre ampoules espacées de 1,9 m au-dessus du couvert permettent de traiter 5 lignes de canne de 8 m. Les facteurs du rendement sont comparés aux pourcentages de floraison.

14. Déterminisme de la floraison

141. Objectifs

Les implications quantitatives comme qualitatives de la floraison sur la production de fibre sont à prendre en compte dans la conception des itinéraires techniques. Quels sont les leviers d'actions dont dispose l'agronome pour contrôler la floraison ? Pour répondre à cette question, nous avons recherché les informations disponibles sur le déterminisme du phénomène.

¹ acide 2-chloroéthylphosphonique

² Les échantillonnages sont destructifs et la floraison affecte une partie non prévisible des talles.

Les recherches sur la floraison ne sont pas liées à ses conséquences agronomiques. Elles répondent à la nécessité pour les sélectionneurs, de réaliser des croisements pour améliorer la culture. L'induction de la floraison et sa synchronisation entre les différentes espèces du complexe *Saccharum* mais aussi entre clones d'une même espèce est à la base du système classique de sélection.

Le problème est complexe : Comment croiser des clones dont les durées individuelles de floraisons sont de l'ordre de 2 semaines mais dont la période de floraison s'étale, selon le clone, sur 5 ou 6 mois ? Les fenêtres de synchronisation sont rendues particulièrement étroites par la faible durée de conservation du pollen.

Nous n'abordons pas dans ce paragraphe les méthodes mises au point pour synchroniser la période de fertilité ou améliorer le temps de stockage du pollen. Notre propos est de rechercher les moyens dont peut disposer l'agronome pour mieux gérer la floraison de la culture.

142. Caractérisation de l'évènement

La période de floraison de la canne à sucre commence à l'équateur au début de l'automne. Les fleurs apparaissent ainsi dans la seconde quinzaine de septembre dans l'hémisphère nord et dans la seconde quinzaine de mars dans l'hémisphère sud. La floraison se décale progressivement au fur et à mesure que l'on s'écarte de l'équateur. On compte environ un mois de retard par dix degrés de latitude. Les limites correspondent approximativement au mois de décembre pour la latitude 30° N et au mois de juin pour la même latitude au sud. Les exceptions à cette règle sont nombreuses. Les clones que l'on déplace de latitude décalent leurs floraisons de plusieurs jours par degré. Ainsi les *S. spontaneum* déplacés au sud de leurs origines fleurissent plus tôt, alors qu'ils deviennent plus tardifs vers le nord.

La floraison de la canne à sucre n'est pas un phénomène généralisé. Il concerne dans un couvert un nombre variable de talles, mais jamais la totalité. L'intérêt agronomique porte donc sur l'intensité de la floraison, qui qualifie le pourcentage de tiges soumises à un arrêt de croissance. L'intensité de la floraison varie avec la précocité. D'une manière générale, les clones dont la floraison est précoce ont une intensité de floraison plus forte que les clones tardifs. Les écarts vont de 70 à 100 % pour les premiers et ne dépassent que rarement 30 % pour les derniers.

[Berding et Moore \(1996\)](#) distinguent deux groupes de variétés selon leur intensité à fleurir dans le temps. La base du classement correspond aux 6 meilleurs années pour la floraison des collections observées pendant 12 ans. Ils distinguent un groupe florifère, qui a fleuri les 6 années et un groupe non florifère qui n'a jamais fleuri.

A potentiel de production équivalent, le choix de l'agronome portera donc de préférence sur des variétés ne fleurissant pas et sur des variétés à floraison tardive plutôt que précoce.

143. Les étapes de la floraison

L'induction florale des graminées nécessite un stade végétatif préalable qui est qualifié de phase juvénile. La durée de cette phase juvénile est un caractère variétal, qui dépendrait aussi des conditions de croissance et notamment de la fertilisation azotée et de l'alimentation hydrique. La phase juvénile de *S. spontaneum* est plus courte que celle de *S. robustum*, qui est elle-même plus courte que celle de *S. officinarum*. Les relations précédemment évoquées entre l'intensité de la floraison et la précocité impliquent que la floraison est d'autant plus intense que la phase juvénile est courte.

En fin de phase juvénile, la tige peut devenir florifère. Le processus de floraison est complexe. [Moore et Nus \(1987\)](#) l'ont découpé en 5 phases :

1. L'induction qui correspond à la transformation de l'apex ;
2. L'initiation où l'apex s'organise en spirale alors que se forment les cellules à l'origine des branches principales et secondaires de la panicule ;
3. La différenciation avec la formation des cellules primordiales des étamines et du carpelle ainsi que le développement des glumes ;
4. La croissance de la panicule et de la tige, et la maturation des fleurs. Cette phase se termine par l'émergence de la panicule ;
5. La fécondation et la maturation des graines.

Les trois premières phases sont réversibles avec un retour vers un état végétatif notamment si la photopériode ne décroît pas (éclairage additionnel) ou en milieu naturel, si les températures sont trop froides. Les réversions produisent en fonction du stade de chaque phase des altérations morphologiques caractéristiques.

Les deux dernières phases sont irréversibles.

[Julien \(1972\)](#) étudiant un clone de *S. spontaneum* et un clone de *S. robustum*, estime à 77 jours la durée séparant l'initiation de la fin de la croissance de l'inflorescence. L'échelle de durée retenue par [Moore et Nus \(1987\)](#) pour les cinq phases précédentes est respectivement de 1, 5, 4, 4 et 2 semaines soit un total de 16 semaines entre le début de l'initiation et la fin de maturation des graines. Les auteurs estiment que la durée de la période séparant l'initiation de la fin de croissance de l'inflorescence est :

- Au minimum de 70 jours pour les clones les plus précoces ; et
- D'environ 100 jours pour les clones les plus tardifs.

Ces chiffres expliquent à eux seuls l'incidence de la floraison sur le rendement : une tige qui fleurit cesse de croître pendant plus de trois mois, période intervenant en pleine saison des pluies, donc pendant la phase de croissance maximale du couvert.

144. La photopériode

La photopériode est le facteur principal de l'initiation de la floraison de la canne à sucre. La longueur du jour à laquelle nous nous référons dans ce paragraphe n'est pas celle du jour astronomique. La luminosité résiduelle avant et après le coucher du soleil accroît la durée d'éclairement à laquelle la canne à sucre est sensible. Les auteurs estiment cet accroissement à environ 15 minutes. La canne à sucre est plus sensible à la lumière crépusculaire que celle de l'aube.

Les périodes d'induction florales sont en relation avec la latitude d'origine de la plante. La canne à sucre peut être une espèce pure ou un hybride impliquant deux espèces différentes ou plus. Le patrimoine génétique de la plante met en jeu les principales variétés de *Saccharum* (*officinarum*, *spontaneum*, *robustum*...), voir parfois, différentes espèces du complexe *Saccharum* (*Erianthus*, *Miscanthus*...). L'origine géographique très diverse des géniteurs, avec des latitudes allant de l'équateur à 40°, implique une grande variabilité de sensibilité au photopériodisme. Or, la sensibilité au photopériodisme d'un clone est toujours intermédiaire entre celle de ses parents. On comprend dès lors que la photopériode va avoir une incidence très variable sur la floraison de la canne à sucre, à l'image de la variabilité de l'origine génétique de la variété cultivée.

L'initiation florale est liée à la photopériode et à sa vitesse d'évolution. La canne à sucre doit recevoir entre 11,5 et 12,4 heures de lumière par jour pour que l'induction florale de l'apex

se produise (Paliatseas, 1962). D'une manière générale, la canne ne fleurit pratiquement pas à l'équateur. L'aptitude à fleurir s'accroît ensuite jusqu'à 12 ou 13° de latitude puis elle décroît jusqu'aux tropiques où elle ne fleurit pratiquement plus. Dans la zone cannière du nord Queensland, la floraison est maximale dans la région de Cairns (17° S). La canne ne fleurit pratiquement plus lorsque l'on approche de la région de Brisbane, limite sud de la zone cannière. De même, la canne à sucre fleurit beaucoup en Guadeloupe (15° N) et très peu à la Réunion (21° S).

Brett et Harding (1974) expliquent partiellement ce phénomène en montrant que la vitesse de diminution de la longueur du jour, fonction de la Latitude, est corrélée négativement au taux d'initiation floral. Cette même diminution est corrélée positivement au taux et à la vitesse d'émergence des panicules.

Dans une expérimentation récente, Berding et al. (2007) identifient des variations génétiques entre clones pour la photopériode critique requise pour l'initiation florale. Ils émettent l'hypothèse d'une variation génétique de la durée du développement des panicules entre la transformation de l'apex et l'ouverture des panicules. Ce dernier point peut expliquer l'existence de variétés dites précoces qui fleurissent en début de saison sucrière et à l'opposé des variétés tardives. James et Miller (1972) étudiant 9 clones caractérisant une gamme d'étalement des floraisons montrent une initiation florale décalée de 35 jours entre les clones les plus précoces et les plus tardifs. Chaque jour de retard de la photo-initiation de l'apex conduit à un retard de floraisons de 1,39 jours.

Selon Midmore (1980), les premières phases de floraison de la canne à sucre requièrent plutôt des longueurs de jours intermédiaires. On dérive ensuite graduellement vers une sensibilité aux jours courts au fil des phases.

La canne à sucre ne peut donc être classée dans une des catégories habituellement utilisées pour les plantes sur la base de la photopériode d'induction :

- La canne à sucre est une plante à jours intermédiaires ou IDP (*intermediate daylength photoperiodism*) pour les phases initiales ;
- Le développement des panicules et des fleurs la classe dans les plantes à jour court ou SDP (*Short daylength photoperiodism*) ;
- Il existe par ailleurs de nombreuses exceptions à ce classement généralement admis. On trouve en effet des *S. spontaneum* présentant toutes les caractéristiques de plante à jour long (LDP : *Long daylength photoperiodism*).

En reprenant le caractère héritable déjà évoqué de la sensibilité à la photopériode, la canne à sucre ne rentre donc pas dans les classements habituels qui caractérisent la floraison des cultures.

On notera que la floraison s'inscrit dans un processus de diminution de la photopériode qui correspond au raccourcissement progressif des jours, de l'initiation à la floraison. Ceci explique pourquoi la photopériode inductive d'environ 12h30 qui se produit 2 fois par an ne déclenche la floraison qu'en automne¹, soit une seule fois par an en conditions de diminution de longueur de jour.

145. L'âge

De nombreux auteurs dont Davies et Vlitos (1970) ; Julien (1973) ou Gosnell (1973) ont démontré que la fin de la phase juvénile qui débute la phase où la floraison est possible, coïncide avec la présence de 2 ou 3 entrenœuds matures à la base des tiges. Pour Davies et

¹ Quelques cas de floraison au printemps sont cependant signalés dans la littérature.

Vlitos (1970), ces conditions sont remplies au bout de 2 ou 3 mois de cycle. Au-delà, les auteurs considèrent que la stimulation de la floraison est quasiment indépendante de l'âge.

Julien *et al.* (1974) indiquent cependant qu'il existe un âge optimum de 12 à 16 semaines pour la floraison. Les tiges disposent alors à leurs bases de 4 à 9 entrenœuds matures.

Les études plus récentes conduites par Berding (1995) en phytotron (*Photoperiod facility*) montrent que l'induction florale varie avec l'âge de la plante. Il existe par ailleurs une forte interaction entre l'âge et la variété. L'auteur opte pour un choix moyen de plantes de 100 jours dans le cadre des programmes australiens de sélection.

146. L'incidence du climat

a. La nébulosité

L'incidence des facteurs climatiques n'est pas toujours bien identifiée compte tenu de leur niveau important d'interaction en milieu naturel. Ainsi, la nébulosité est souvent mentionnée comme un facteur favorable à la floraison. Sur l'île de La Réunion, les collections destinées aux croisements sont localisées sur la côte au vent, où la nébulosité est très importante et la floraison intense. La floraison sur la côte sous le vent, très ensoleillée, est beaucoup plus aléatoire et de plus faible intensité. Or, nous n'avons pas trouvé d'étude reliant l'énergie lumineuse incidente à l'intensité de la floraison.

Le différentiel de floraison entre les deux versants de l'île s'explique en fait par la sensibilité de la floraison à l'alimentation hydrique et non par la nébulosité (*Ch.II-§146-c*). Les conditions climatiques de la côte est, avec des températures plus basses, une évaporation plus faible, ainsi qu'une humidité et une pluviométrie plus élevée, sont plus favorables à la floraison que celles de la côte ouest.

b. La température

Les fortes températures au moment de la photo-initiation inhibent la floraison. Le cultivar R570, dans les conditions réunionnaises, ne fleurit pratiquement jamais au niveau de la mer. Il fleurit de manière croissante lorsque l'altitude de la culture augmente et que la température moyenne diminue. Il est probable que le stimulus thermique soit associé à une période déterminée du stade de développement de la plante.

Berding et Moore, (2001), montrent que la photo induction florale est fortement diminuée lorsque la température maximum journalière atteint ou dépasse 32° C. Le problème thermique rend cependant difficile la maîtrise de la floraison, même en conditions contrôlées de photopériode et d'alimentation minérale et hydrique.

Les auteurs proposent donc comme solution¹ des stratégies « d'évitement ». Il s'agit d'empêcher l'initiation naturelle par un accroissement artificiel de la longueur du jour à 14,5 heures.

Les basses températures ont aussi une influence sur la floraison (Coleman, 1963). La floraison ne se produit pas lorsque la température devient inférieure à 18° C. L'auteur montre en outre que l'induction peut être partiellement à totalement supprimée selon le nombre de jour pendant lesquels la température minimale est inférieure au seuil thermique de l'induction.

La *Figure 3* est une image approximative des résultats que Coleman (1963) a obtenu dans les conditions Hawaïennes.

¹ Il s'agit ici de synchroniser les floraisons en vue de croiser les différents clones.

Les nuits non inductives sont caractérisées par des températures de 65° F ou inférieures. La floraison a été qualifiée pendant plusieurs années sur le terrain (pas de floraison, floraison légère, moyenne, forte ou très forte) puis reportée sur une échelle quantitative approximative par l'auteur.

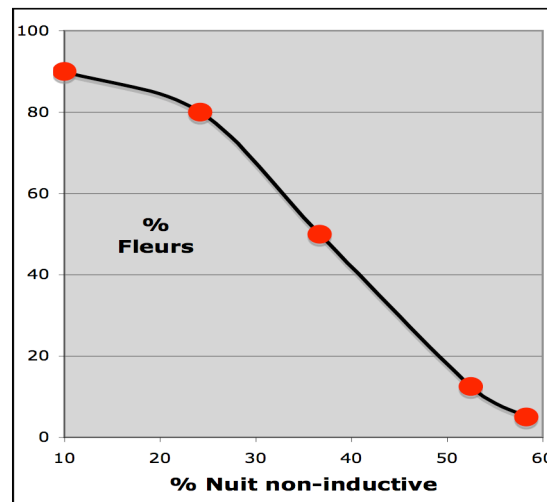


Figure 3 : Température min. et floraison (Coleman, 1983)

Conformément aux effets largement connus de la température sur la croissance, les faibles températures ont une incidence importante sur la croissance et l'émergence de l'inflorescence. La floraison est retardée et les fleurs plus petites lorsque la température est inférieure à 21° C.

Pour reprendre notre exemple réunionnais, il est ainsi probable que la floraison de la R570 diminue progressivement sur la côte ouest¹, lorsque l'altitude devient importante.

Les températures moyennes journalières optimales pour la floraison de la canne à sucre sont de l'ordre de 28° C pour la partie diurne et de 23° C pour la partie nocturne.

Le paramètre thermique revêt actuellement une importance pour les sélectionneurs. La sélection pour l'absence de floraison dans le Queensland, repose en partie sur des caractères de sensibilité aux fortes températures pendant la phase d'initiation florale.

c. L'alimentation hydrique

L'alimentation hydrique est aussi un paramètre important de la floraison. La phase de floraison se déroule de fait en saison des pluies, même si elle s'achève pendant la période sèche, notamment pour les variétés tardives. Gosnell (1973) indique qu'une humidité importante du sol, ou la présence à faible profondeur d'une nappe d'eau, sont des facteurs favorables à la floraison.

Singh et al. (1988) montrent qu'un stress hydrique pendant l'initiation florale supprime de manière substantielle la floraison de quatre variétés tardives dans les conditions de Coimbatore (latitude 11°).

À l'inverse, l'irrigation utilisée pour diminuer la température² et améliorer l'alimentation hydrique, accroît fortement l'intensité de floraison en zone chaude et sèche. Les études pluriannuelles portant sur des collections montrent que chaque étape vers la satisfaction des besoins en eau se traduit par un accroissement de l'intensité de la floraison. Les

¹ Extension altitudinale très supérieur à celui de la côte est (plus de 1000m vs moins de 500 m).

² Il s'agit bien sûr de contrôle de floraison pour la sélection et non pas pour la production.

expériences sur l'irrigation indiquent par ailleurs des différences clonales de sensibilité de la floraison à la sécheresse.

L'importance d'une bonne alimentation hydrique et d'une humidité adéquate lors des dernières phases de la floraison explique en grande partie « l'effet de la nébulosité » observée à la Réunion. Les cultures de la côte Est sont rarement soumises à des déficits hydriques, contrairement à celles de la côte Ouest.

d. Autres paramètres

Il reste de nombreuses zones d'ombre dans le déterminisme de la floraison de la canne à sucre. Les interactions entre le génotype et l'environnement sont à l'image de la complexité patrimoniale de la plante. [Berding et al. \(2007\)](#) identifient ainsi des clones fleurissant mieux dans des conditions naturelles qu'en phytotron où tous les paramètres influents connus sont contrôlés (photopériode, vitesse de déclin, température, et alimentation minérale et hydrique). Les auteurs étudient actuellement 7 clones qui sont caractérisés par une absence totale de floraison en condition naturelle ou contrôlée. La maîtrise des paramètres connus pour influencer le processus de floraison de la canne à sucre ne permet que des taux de floraison de l'ordre de 70 %.

En fait, la canne à sucre est issue de croisement entre des cannes sauvages et de la canne noble. Le *S. spontaneum* est l'un des parents les plus courants. Il intervient dans 15 à 25 % du génome des cannes à sucre cultivées. *S. spontaneum* est très florifère, même dans des conditions septentrionales. Sa diffusion par graine est considérable. La structure génétique de la descendance pourrait expliquer qu'il existe des filiations non-florifères au-delà de la distribution de la gamme d'aptitude à la floraison héritée des parents.

Nous n'aborderons pas ici le déterminisme physiologique de l'induction florale qui met en jeu de nombreux processus biochimiques hors sujet dans cette note. Citons cependant que l'induction florale peut diminuer ou augmenter par l'emploi de régulateurs de croissance (auxines, gibbérellines, acide indole acétique...) et de nombreuses autres molécules, dont les herbicides ([Rizk et al. 2004](#)).

147. L'alimentation minérale

L'azote joue un rôle important dans le processus de floraison de la canne à sucre. L'alimentation azotée des plantes est directement liée à l'alimentation hydrique. L'azote ne peut interférer avec la floraison que lorsque l'alimentation hydrique est optimale.

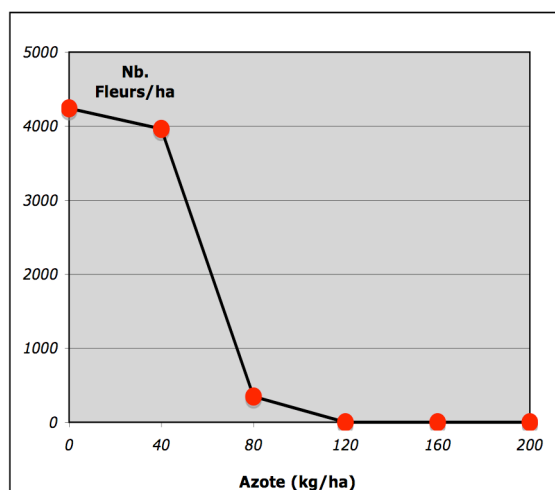


Figure 4 : Azote et floraison ([Gosnell, 1973](#))

La floraison ne se produit que sur des plantes vigoureuses, bien alimentées en azote. Cependant, [Gosnell \(1973\)](#) et de [Nuss \(1977\)](#) montrent que la présence d'azote en excès inhibe la floraison. Cet effet inhibiteur de l'azote, qui intéresse l'agronome, dépend du clone et de l'âge de la culture.

Pour un même clone, plus la culture est jeune, moins la dose d'azote inhibitrice sera élevée. [Gosnell \(1973\)](#) identifie des clones très sensibles à l'azote qui sont incapables de fleurir en condition d'alimentation azotée normale. La *Figure 4* établie d'après les données de l'auteur, montre l'effet de l'azote sur la floraison du clone Co1001.

Notons enfin qu'il existe des clones insensibles à l'inhibition azotée ([Chang et Huang, 1980](#)). Les auteurs expliquent le phénomène en indiquant l'absence de variation du rapport C/N dans la feuille TVD+1 pour des variétés très florifères, non florifères et intermédiaires.

15. Conséquences agronomiques

151. Les recherches à développer

Les conséquences agronomiques de la floraison, sur la production de sucre et la production de fibre, sont évidentes : la talle qui fleurit arrête de fait sa croissance et se « vide » pendant une période qui correspond approximativement à 20 % du cycle intercoupe et plus de 35 % de la période de pleine croissance de la culture.

La plupart des connaissances de l'influence quantitative comme qualitative de la floraison sur la production de fibre sont anciennes ([Dillewijn, 1952](#)). Les variations des paramètres de production et de qualité au cours du cycle et en fonction de la floraison sont essentiellement relatives au sucre. La quantification de l'effet floraison, et parallèlement de la verse, sur la production de sucre a été récemment réactualisée par la recherche sucrière australienne.

L'influence de la floraison sur les allocations des principaux métabolites (stockage déstockage) et le redémarrage du tallage est par conséquent un domaine novateur, même si la méthodologie de telles études reste complexe dès lors qu'il s'agit de comparer des talles initiées et non-initiées d'un même clone. Il devrait être possible de modéliser les pertes si on connaît le pourcentage de talles fleuries. Par contre, **des études complémentaires sont à développer pour estimer l'incidence de la floraison sur la qualité des fibres en regardant plus spécifiquement les problèmes de délignification et l'incidence sur la fibre cellulosique.** De telles études pourront inclure avec un intérêt scientifique évident un témoin Poacée fourragère. Les graminées fourragères ont en effet la particularité de fleurir abondamment, tandis que contrairement à la canne à sucre, la floraison se traduit par une lignification qui diminue la digestibilité de la production.

L'évolution de l'eau et de la lignine au cours du cycle doit encore être précisés. Peu de choses existent dans la bibliographie sur le devenir de ces deux composantes essentielles pour les cycles longs (plus de 12 mois) et en fonction de la floraison. L'évolution comparée de ces paramètres pour des clones d'aptitude sucrière et fibreuse est également méconnue.

L'âge de « maturité » de la production va être liée aux usages. Pour la fibre alimentaire (élevage), des récoltes précoces permettront d'éviter des teneurs élevées en lignines, mais produiront une biomasse très hydratée. Pour la fibre énergétique, la qualité repose sur un maximum de lignification et un minimum d'eau. Ceci conduit donc à des cycles d'au moins 12 mois. L'âge devra cependant être optimisé pour chaque site et chaque cultivar en fonction notamment des pourcentages de floraison et des teneurs industrielles souhaitables en lignines cellulose et eau.

152. La gestion de la floraison

Selon [Moore \(1985\)](#), l'agronome ne dispose que de peu de moyens pour gérer la floraison. Les manipulations de facteurs comme l'âge¹, la photopériode la température ou l'alimentation hydrique sont impossibles ou trop coûteux au champ. La gestion de la nutrition azotée est le plus souvent en contradiction avec les objectifs de rendement. Seuls les régulateurs de croissance ont été utilisés avec succès. L'une des molécules les plus efficaces semble être l'etephon®, qui réduit significativement la floraison pour une large gamme de date d'application et qui stimule la croissance ([Osgood, 1983](#)). Les règles concernant l'usage des molécules chimiques en agriculture ont cependant largement évolué. Ce type de technique efficace et économique ne relève généralement pas d'une agriculture renouvelable préservant le milieu.

Nous disposons cependant de quelques moyens pour gérer la floraison au travers de l'itinéraire technique. Il s'agit en premier lieu de faire un choix variétal en accord avec le milieu opérationnel :

- Plus la Latitude est faible, plus les caractéristiques génétiques du matériel végétal seront impliquées. Le choix devra porter sur des cultivars à faible intensité de floraison et à floraison tardives. [Jakob et al. \(2009\)](#) définissent un idéotype de Poacées en C4 pour la production d'éthanol cellulosique sans fleur ou à floraison tardive et sans graine².
- Le même type de choix devra être opéré si l'occurrence de jours avec des températures maximales inférieures à 32° C est importante. Ce problème est le plus souvent rencontré pour les plantations d'altitude.

Un autre paramètre est, en culture irriguée, la gestion de l'alimentation hydrique lors de la période d'initiation florale. Les choix du calage du cycle peut aussi participer au contrôle de la floraison, dans le cas particulier de productions dédiées à la fibre. L'idéal serait de disposer de couverts très jeunes ou proches de la maturité au moment de la phase d'initiation.

Des recherches sont à conduire sur l'évolution de la qualité de la fibre au cours du processus de floraison. Le processus de délignification pourrait en effet être exploitable pour améliorer la qualité des fibres produites.

2. La feuille

La littérature scientifique ne fournit que peu d'indications sur les fibres issues des feuilles de canne à sucre. Elles représentent cependant une part non négligeable de la biomasse. De dimension très variable, les feuilles complètement développées mesurent généralement plus d'un mètre pour une surface moyenne de l'ordre de 0,05 m².

Les caractéristiques anatomiques, que nous rappelons dans ce paragraphe, concernent surtout la partie fibre.

La caractérisation qualitative des fibres des feuilles en vue de leur usage industriel est un sujet de recherche novateur compte tenu du volume produit par la culture, des possibilités techniques de collecte, et de la quasi absence de références sur le sujet.

¹ L'âge n'est pas gérable dans le cadre d'une filière sucre à laquelle l'auteur fait référence. Il doit l'être en partie pour une filière dédiée à la fibre (**étude à entreprendre**).

² Probable référence à des fleurs stériles. La production de graine va accroître le « défilage » de la culture.

21. La Gaine

La gaine est constituée de rangées radiales de faisceaux fibro-vasculaires comparables à ceux de la tige. Ces faisceaux sont immergés dans un parenchyme. Les faisceaux les plus larges sont au centre (équidistant des bords interne et externe du limbe).

Des particularités anatomiques variables au niveau des attaches de la gaine à la tige et au limbe (tissus aérifères, épaississements, réagencement des vaisseaux...), confèrent des caractéristiques mécaniques (souplesse, résistance...) et expliquent les différences variétales observées pour la capacité au défoliage en fin de vie.

Une particularité ontogénique étonnante de la gaine est le développement cellulaire intense qui crée un véritable cambium entre le phloème et le xylème. Ce tissu actif crée des connexions transversales entre vaisseaux qui constituent des formations secondaires normalement spécifiques des dicotylédones.

L'épiderme externe du limbe ne diffère de celui de la tige que par la présence plus ou moins importante de poils (caractère variétal). L'épiderme interne est caractérisé par l'absence de cellules courtes (siliceuses).

22. Le limbe

Il existe trois types de faisceaux vasculaires dans le limbe, qui diffèrent par leur dimension :

- Des grands faisceaux rhomboïdes ou ovales situés au centre du limbe, toujours accompagné de deux petits faisceaux ;
- Des faisceaux de dimension moyenne et de forme ovale localisés également au centre ;
- Des petits faisceaux ronds localisés près de l'épiderme inférieur et par couple autour des grands faisceaux.

Cet ensemble est organisé avec une alternance entre des faisceaux de petite et moyenne dimension et des grands faisceaux. Tous les faisceaux sont regroupés sur la face inférieure du limbe. La dureté de la nervure médiane, liée à son niveau de lignification, est un caractère variétal. Cette dureté est associée à une sensibilité aux borers du sommet des tiges (*Scirpophaga nivella* F.).

L'épiderme du limbe diffère de celui de la tige. Sa partie supérieure alterne des séquences constituées :

- D'une alternance de cellules siliceuses et de liège ;
- De deux bandes stomatiques ; et
- D'une bande marginale où les cellules siliceuses sont parfois remplacées par des poils ou des épines.

La partie inférieure de l'épiderme se compose :

- D'une zone intercostale comportant des stomates et quelques cellules siliceuses ; et
- D'une zone de nervure entourant les faisceaux vasculaires où l'on retrouve des cellules longues, des cellules siliceuses et des poils et piquants.

Nous retiendrons pour leur éventuelle utilisation, que les feuilles sont riches en faisceaux longs, pauvres en tissu de remplissage et riches en silice.

III. COMPOSITION ET SYNTHÈSE DES FIBRES

1. Origine des fibres

La lignocellulose est apparue, il y a 400 millions d'années, avec le passage des plantes du milieu aquatique au milieu terrestre. La lignocellulose a donné aux plantes la structure, le maintien et la protection indispensable à un développement en milieu aérien. La lignocellulose représente aujourd'hui 90 % du carbone de la biosphère et correspond à une production moyenne de matière sèche de l'ordre de 10 t/ha/an.

Comme nous venons de le voir, la fibre de canne à sucre fait le plus souvent référence à la bagasse. Il s'agit d'un mélange hétérogène complexe qualifié de lignocellulose, constitué « *de types cellulaires généralement associés en faisceaux dans des organes et des tissus distincts* ». (Chabbert et al. 2006).

La canne à sucre produit des fibres dites non ligneuses¹ bien qu'elles contiennent de la lignine. Comparée à celle du cotonnier², la fibre de bagasse peut être qualifiée de non conventionnelle. Elle provient de la tige. Elle est constituée de carbohydrates de structure organisés en tissus qui assurent à la plante une triple fonction de soutien, de protection contre les agresseurs, et de conduction des fluides.

La fibre que nous décrivons correspond à de la bagasse traitée, débarrassée de manière plus ou moins poussée des matières étrangères indésirables (cires, parenchyme...). La bagasse n'est pas de la fibre. La bagasse est une source de fibre. Elle ne peut être employée brute, même pour les usages les moins sophistiqués (panneaux, remplissage...) car elle conduirait à des matériaux sans intérêt technique.

Nous ne disposons pas d'informations spécifiques aux fibres contenues dans la biomasse résiduelle. L'intérêt des feuilles comme source de fibre reste donc à déterminer. Les quelques informations évoquées précédemment indiquent par ailleurs que les fouets sont une source potentielle très intéressante de fibre de qualité.

Nous avons limité l'étude aux trois principaux polymères composant la fibre. Ce chapitre fait référence à de nombreuses molécules organiques. Elles sont évoquées lorsqu'elles présentent un intérêt dans la compréhension agronomique de la production des fibres des Poacées. Nous n'avons pas, faute d'un logiciel approprié, représenté ces molécules sous forme graphique, mais les formules sont aisément consultables sur le Web.

Les lignines occupent une place prépondérante dans ce chapitre. Ceci est justifié par :

- Leurs importances dans de nombreux domaines (pédogenèse, allélopathie et contrôle de l'enherbement, résistance aux maladies et parasites...), et leur valeur économique potentielle (biomatériaux, chimie verte...) ;

¹ Par opposition aux fibres ligneuses proviennent des arbres. Les deux groupes contiennent des lignines.

² Fibre cellulosique pratiquement pure, lié à la graine.

- Le fait qu'elles représentent la principale contrainte à la plupart des usages des fibres (alimentation animale, biocarburant de seconde génération, papier, chimie verte...);
- Le fait qu'elles soient encore très mal connues, car de structure complexe et variable et de composition chimique aléatoire.

2. Les composantes chimiques

21. Composition globale

Les parois végétales, d'où proviennent les fibres cellulósiques, sont des composés chimiques complexes. On y retrouve comme dans toute plante les principales familles de métabolites primaires : glucides, lipides et protéides avec le cortège de leurs innombrables précurseurs et dérivés ainsi que les trois principales familles de métabolites secondaires que sont les phénols, les terpènes et les alcaloïdes. Les composantes essentielles de la fibre, qui nous intéressent sont deux polymères glucidiques, la cellulose et l'hémicellulose et un polyphénol, la lignine. Nous nous intéressons aussi à quelques acides phénoliques qui jouent un rôle spécifique chez les Poacées dans la réticulation de la lignocellulose.

Les polymères glucidiques sont la cellulose, les hémicelluloses et les substances pectiques. Ils constituent, pour la chimie verte, une source potentielle de produits de type aliphatiques (éthanol, méthanol, furfural...).

Les polymères phénoliques principaux sont les lignines, les tanins solubles (gallotanins) et les tanins condensés (tanins catéchiques). Ils représentent, pour la chimie verte, une source potentielle encore peu exploitée de dérivés aromatiques. Nombre de ces substances phénoliques de la canne à sucre que l'on retrouve dans le jus, la mélasse, mais aussi dans la bagasse, présentent d'intéressantes activités antioxydantes ([Mathew et Abraham 2000](#) ; [Duarte-Almeida et al. 2006](#)). Ces molécules interviennent avec les tannins dans les processus d'élaboration des arômes du rhum ([Batista de Aquino et al. 2006](#)).

La bagasse de canne à sucre contient également des acides aminés. Des échantillons d'Afrique du Sud, analysés par [Du Toit et Van Bijon \(1984\)](#) contenaient 78,36 µmol d'acides aminés par gramme de bagasse. Les principaux acides aminés identifiés étaient la glycine (12,7 µmol/g) l'alanine (9,87 µmol/g) les acides aspartiques (9,27 µmol/g) et glutamiques (9,00 µmol/g) la valine (7,28 µmol/g) et la sérine (6,28 µmol/g).

Les auteurs font également état de 16,60 µmol de NH₃, ce qui porte le total des substances aminées à 94,96 µmol/g de bagasse.

On compte en outre une multitude de molécules organiques que nous nous limitons à évoquer (sucres divers, pectines, protéines, cires, acides gras, acides organiques, composés cycliques autres que les phénols...) ainsi que des composés minéraux sous forme de carbonate, sulfate, oxalate, citrate... Cette liste, indiquée pour mémoire, est loin d'être exhaustive. Elle donne une idée de la richesse en métabolites organiques qui pourraient être valorisés par bioraffinage.

On peut faire l'hypothèse d'une localisation préférentielle de ces métabolites en fonction de leur solubilité et de leur complexité. La bagasse est composée de fibres insolubles et mécaniquement cohérentes qui constituent de fait la majorité des parties grossières présentes. Les parties plus fines sont formées des cellules des tissus médullaires et entourant les fibres ([Ch.IV-§213](#)).

La partie grossière est constituée surtout de lignocellulose associée au transport de sève brute où se localisent les minéraux et les protéines et métabolites de transport.

La partie fine peu lignifiée et donc plus dispersée par le broyage correspond plus aux tissus participant au transfert de la sève élaborée et au stockage. On y retrouvera donc une partie plus importante de métabolites élaborés et de composés résiduels de l'extraction du jus. C'est le cas notamment du sucre pratiquement absent des parties grossières, et présent à hauteur de 2 à 4% dans les parties fines.

22. Composition des sources de fibre

221. Les principaux constituants

La fibre cellulosique, à la base de tous les usages textiles, n'est pas isolée dans la plante. La cellulose est en effet une des composantes de la fibre brute dans laquelle elle est imprégnée d'une gangue d'hémicellulose et de lignines.

Pour [Morand \(2004\)](#) la bagasse est composée d'eau (48 à 52 %), de fibres lignocellulosiques (43 à 52 %) et de résidus solubles divers (2 à 6 %) parmi lesquels figurent des sucres. La teneur de la bagasse en sucres résiduels, que le procédé industriel ne peut extraire, varie de 1 à 3 % ([Chesman, 2005](#)).

La composition lignocellulosique de la canne à sucre varie de manière importante en fonction d'un grand nombre de facteurs difficilement quantifiables et pas toujours identifiables, touchant à la fois à l'itinéraire technique (variétés, âge, fertilisation...), aux conditions pédoclimatiques, et aux procédés industriels. Quelques données extraites des études de [Patureau \(1989\)](#), qui distinguent la bagasse entière, la fibre de bagasse et la moelle de bagasse, le démontrent à l'échelle de pays producteurs ([Tableau 7](#)).

Tableau 7 : Composition de la bagasse de canne à sucre en % MS

Origine	Partie	Cellulose	Hémi-cellulose	Lignine	Cendre	Soluble*
Monde	Entière	36,0	26,0	20,0	2,2	3,2
	Fibre	41,0	22,5	20,5	1,2	1,8
	Moelle	35,5	29,0	21,0	3,2	3,0
Hawaii	Entière	38,7	27,1	21,6	4,6	2,6
	Fibre	42,5	27,7	22,0	0,6	0,4
	Moelle	35,3	28,7	21,5	2,1	1,6
Philippines	Entière	34,9	31,8	22,3	2,3	2,8
	Fibre	41,2	31,2	21,8	1,2	1,9
	Moelle	34,9	33,2	22,5	2,6	3,6

* Extraction à l'eau chaude

Le [Tableau 8](#) montre des écarts de composition selon quelques sources bibliographiques ([TAPPI, 1983](#) ; [Rinaudo et Joseleau, 2008](#) ; [Conçalves et al. 2005](#) ; [Irvine et Benda, 1979](#) ; [Sene et al. 2002](#) ; [Wood, 1981](#)). À titre de comparaison, le linter¹ de coton sec contient 80 à 85 % de cellulose, 1 à 3 % d'hémicelluloses, 0 % de lignine et 0,8 à 2 % de cendres. Pour [Parry \(1960\)](#), la matière sèche de la fibre brute de coton contient 95 % de cellulose 0,9 % de substances pectiques (dont les hémicelluloses) et 1 % de cendre. Le reste est constitué de protéines (1,6 %) de cires (0,9 %) et d'éléments autres (1,7 %).

La lignocellulose de canne à sucre diffère de celle d'autres plantes textiles dont les fibres sont aussi issues des tiges ([Tableau 9](#)). Les données proviennent des études de [Rinaudo et Joseleau, \(2008\)](#) auxquelles nous avons adjoint des caractéristiques de *S. spontaneum*

¹ Résidus de fibres adhérentes à la graine après l'égrenage.

(Chandel et al. 2009). La bagasse s'avère une bonne source de cellulose et d'hémicellulose¹. Le *S. spontaneum* est remarquable par son contenu en cellulose et en lignines.

Tableau 8 : Répartition moyenne de la matière sèche de la bagasse de canne à sucre.

Composantes	Auteurs					
	TAPPI ²	Rinaudo	Conçaves	Irvine	Wood	Sene
Cellulose	45-50	32-44	43,7	36,3	48-58	46
Hémicellulose	23-30	27-32	24,4	28,2		24,5
Lignines	20-25	19-24	28,0	20,2	18-22	19,95
Lipides et cires	3-4					3,5
Cendres	1-2	1,5-5	0,75	2,3	2-5	2,4
Silice		0,7-3,5				2,0
Autre	Traces			12,8		1,7

La richesse en lignine de la bagasse de canne à sucre représente en moyenne 75 % de celle des ligneux tropicaux. Cette teneur peu élevée en lignine en fait une ressource appréciable dans l'industrie papetière en permettant la production de pâte³ (*Pulp, pulping*) et les opérations associées de blanchiment⁴ avec un niveau plus bas de produits chimiques.

La teneur en hémicelluloses de la canne à sucre est environ 1,5 fois plus élevées que celles des feuillus tropicaux, et 3 à 4 fois plus élevées que celle des conifères. Ceci explique les caractéristiques particulières des pâtes de canne à sucre (facilité de broyage, hydratation importante) et l'intérêt de la bagasse pour la production de furfural (*chIII-§321*).

Tableau 9 : Compositions chimiques en %MS de fibres lignocellulosiques

Espèces	Plante	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Cendres	
					Total	dont Si
Non ligneuses	Canne à sucre (bagasse)	32-44	27-32	19-24	1,5-5	0,7-3,5
	<i>Saccharum spontaneum</i>	45.1	22.8	24,4	2,8	
	Kenaf	31-39	22-23	15-19	2,5	-
	Bambou	26-43	15-26	21-31	1,7-5	0,7
	Jute	41	18-22	24	0,6-1	-
	Riz (paille)	28-36	26-32	12-16	15-20	9-14
Ligneuses	Conifères	40-45	7-14	26-34	<1	-
	Feuillus	38-49	19-26	23-30	<1	-

Les informations citées par d'autres auteurs sur la composition de la bagasse n'entrent pas toujours dans la fourchette de teneur indiquée dans les tableaux précédents. Nous trouvons ainsi des teneurs « moyennes » en cellulose de 53% (Ashori et Nourbakhsh, 2009) ; 54,2 % (Atkinson, 1993) et 56 à 60 % (Ibrahim et al. 1985) tandis que des auteurs estiment que la cellulose représente en moyenne 50 % de la bagasse (Pandey et al. 2000 ; Batra, 1993). Ces écarts que l'on retrouve pour les autres polymères ont trois origines principales :

- La variabilité naturelle (variété, âge, conditions climatiques...) ;

¹ Ces informations ne sont qu'indicatives. Issues de collectes de données bibliographiques, leur homogénéité en matière de méthode d'analyse et d'échantillonnage n'est pas garantie.

² Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Importante ONG qui édite des livres, des revues scientifiques et techniques, des standards (analyses...) dont le domaine s'étend aujourd'hui à la plupart des usages des fibres lignocellulosiques comme l'indique son site web (<http://www.tappi.org>)

³ Procédé de délignification de la lignocellulose qui produit une pâte utilisée surtout dans l'industrie papetière. A noter que la pâte brute est commercialisée sous forme de balles par quelques pays sucriers comme la Thaïlande.

⁴ Procédé chimique final de délignification qui permet de diminuer la couleur des pâtes.

- Des caractéristiques spécifiques d'échantillonnage (produit brut, fibre nettoyées des poussières, bagasse industrielle ou produite en laboratoire à partir de tiges...) ; et
- Des problèmes de méthode d'analyse qui mettent en évidence :
 - La difficulté de séparer chimiquement les trois principaux constituants de la lignocellulose ; et
 - Les difficultés de les isoler sans les modifier.

Les composantes de la lignocellulose des feuilles sont rarement étudiées. [Sharma et al. \(2007\)](#) indiquent un différentiel de composition entre les tiges et les gaines des feuilles de canne à sucre (**Tableau 10**) choisis dans une collection de cultivars indiens regroupés en fonction de leur résistance à un foreur des tiges (*Chilio auricilius*).

Tableau 10 : Compositions de la biomasse de cultivars indiens de canne à sucre

Organe	NDF ¹	ADF ²	Cellulose	Lignines	Phénols et tannins
Tige	52,2-66,3	28,3-41,9	22,2-31,0	4,7-6,1	9,7-10,2
Gaine	62,1-69,9	30,4-35,5	28,8-32,5	2,4-3,2	10,0-12,7

222. La silice

La richesse en silice de la fibre de canne à sucre est beaucoup plus faible que celle du riz. Elle peut représenter cependant une contrainte. Dans la plupart des procédés d'extraction de la fibre, comme la réduction en pâte, la silice se retrouve dans la même solution que les lignines. Une séparation est alors nécessaire pour la valorisation énergétique des lignines (usage le plus courant aujourd'hui) pour éviter des phénomènes d'usure et de dépôts préjudiciables aux installations industrielles.

La silice est un élément minéral mineur mais important pour la culture en particulier pour son rôle dans la maîtrise des tensions biotiques et abiotiques que subit la plante. La silice est prélevée à partir des silicates du sol. Elle est transportée dans la plante sous forme d'acide silicique. Elle se dépose ensuite de manière irréversible dans les tissus « externes » ([Bacic et al. 1988](#)) sous la forme d'un solide amorphe constitué de silice hydratée ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) caractérisée par de nombreux groupes Si-OH ([Mann et al. 1983](#)). Des carences en silice ayant une incidence sur le rendement sont fréquentes sur certains sols en particulier en Australie ([Kingston et al. 2005](#) ; [Berthelsen et al. 2001](#)) et en Floride ([Deren et al. 1993](#)). Elles sont corrigées par des apports de silicates sous différentes formes chimiques³. L'application de silice sur canne à sucre décroît significativement la pénétration du foreur des tiges de la canne à sucre (*Eldana saccharina*) ([Keeping et Meyer, 2002](#)). Les dommages et la croissance pondérale des larves sont alors réduits ([Kvedaras et Keeping, 2007](#); [Keeping et al. 2009](#)). [Kvedaras et al. \(2009\)](#) montrent que la silice joue même un rôle actif dans l'usure des mandibules des larves.

D'importantes consommations de luxe en silice apparaissent dès que les sols en sont bien pourvus, ou à la suite d'une fertilisation. Elles se traduisent par une accumulation dans les parties épidermiques des tiges et des feuilles.

Les techniques agronomiques ne permettent pas d'envisager une réduction des teneurs en silice de la canne à sucre. Par contre, les techniques génétiques de précisions pourraient y

¹ Neutral Detergent Fiber

² Acid Detergent Fiber

³ On utilise parfois du ciment (silicate de calcium), mais les hautes température des précédés de fabrication limitent la solubilité.

contribuer. Il est en effet possible d'envisager à terme de diminuer la teneur en silice dans les Poacées par génie génétique. Des recherches récentes ont en effet permis de découvrir deux gènes du riz, contribuant à diminuer la teneur en silice. Le gène **Lsi1**¹, joue sur la perméabilité membranaire des racines² en modulant le flux d'entrée (Ma et al. 2006). Le gène **Lsi2** également exprimé dans les racines, joue sur le flux transport de la silice dans la plante (Ma et al. 2007). D'autres gènes ont été identifiés depuis, dont le gène **Lsi6** qui code pour une aquaporine localisée dans les feuilles. Sa régulation affecte les dépôts de silice dans la feuille (Yamaji et al. 2008). Les dépôts se font sous forme de silice ou d'acide silicique déshydratée.

23. Évolution des constituants au cours du cycle

Les nutritionnistes animaux s'intéressent à la fibre de canne à sucre malgré sa faible teneur en protéine et sa faible digestibilité. La canne à sucre produit en effet de la biomasse en période sèche, lorsque la production et la valeur nutritionnelle des fourrages sont fortement affectée. La qualité énergétique de la canne à sucre s'accroît de plus avec la saison sèche alors que celle des fourrages chute.

Une expérimentation menée en Floride semble indiquer que les variations de teneur en fibre avec l'âge sont variétales et dépendent de l'occurrence de la floraison (Tai, 1993). Thai et al. (1996) montrent par ailleurs que pendant la phase de maturation, la teneur en fibre de la canne à sucre croît de manière linéaire avec l'âge de la culture, mais que cette croissance est relativement faible et dépend des clones. **Qu'en est-il pour des variétés fibreuses ou fourragères ?**

Pate (1979) a étudié les variations de la composition de la biomasse en Floride, pour un cycle de 16 mois (Figure 5)³.

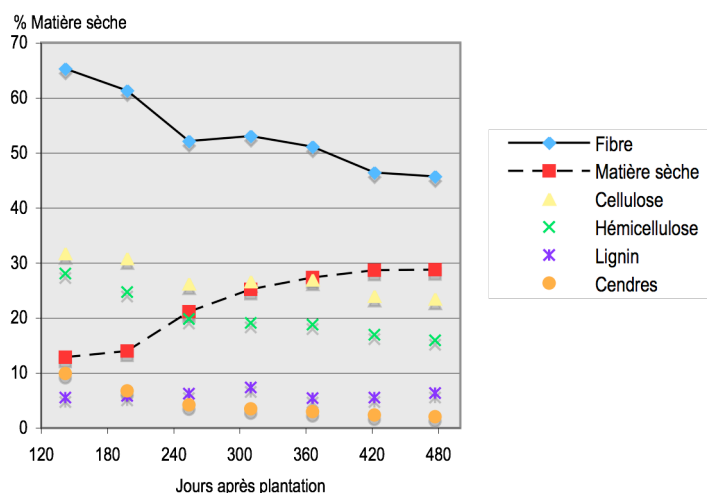


Figure 5 : Evolution de la fibre de canne à sucre au cours du cycle

En dehors des fluctuations saisonnières (premières mesure en avril, puis pas de 56 jours entre deux mesures), on constate une diminution globale au cours du cycle de la fibre et de

¹ Lsi pour Low Silicon rice

² Gène codant pour des protéines proches de celles qui sont impliquées dans le transfert de l'eau dans les racines (les aquaporines).

³ Graphique construit d'après les chiffres de l'auteur exprimés en % MS et modifiés par les calculs suivants : hémicellulose = NDF-ADF ; fibre = cellulose+hémicellulose+lignines.

ses composantes. Ce phénomène est complété par un accroissement de la fraction soluble de l'azote (non représenté sur le graphique).

Ces changements enregistrés à partir de l'étude de 5 variétés de canne à sucre CP¹ sont en relation avec le stockage des sucres au fur et à mesure de la maturité. Ils sont intéressants car contrairement à ce qui se produit généralement chez les graminées fourragères. Ces dernières sont caractérisées par un accroissement de la partie fibreuse de la biomasse au fur et à mesure de la maturation qui correspond dans ce cas à la floraison.

Salas *et al.* (1992), travaillant sur des variétés cultivées en Guadeloupe pour le sucre, montrent une diminution du rapport sucre/fibre au cours du cycle. Le ratio passe de 0,71 à 8 mois à 0,55 à 12 mois. Le paramètre est en outre dépendant de la variété avec un éventail de valeurs entre 0,64 et 1,05 pour les 18 variétés sucrières testées.

Ceci renforce l'intérêt déjà évoqué de conduire des recherches pour préciser l'évolution de la composition de la biomasse au cours du cycle pour des variétés sucrières et fibreuses du complexe *Saccharum* ainsi que pour des Poacées en C4 fourragères, comme le *Pennisetum purpureum* ou le *Panicum virgatum*. Une thèse a été entreprise à La Réunion² dans cette optique sur la canne à sucre. Ce type d'étude devrait permettre de préciser les fenêtres de récolte en fonction des objectifs de qualité de la fibre.

3. Les principaux polymères glucidiques

La fraction totale des polysaccharides composant la fibre lignocellulosique est parfois définie par le terme holocellulose dans la littérature. L'holocellulose est composée de la cellulose et des hémicelluloses résiduelles après extraction des lignines.

31. La cellulose

311. Caractérisation du polymère

La cellulose est le constituant principal des parois cellulaires des plantes. Elle est la substance naturelle la plus importante de la biosphère.

La cellulose est une macromolécule linéaire constituée quasi exclusivement de molécules de glucose reliées entre elles par des liaisons β 1-4. La taille du polymère dépend du nombre de ces molécules. Elle est mesurée par le degré de polymérisation (DL).

Le DL est le nombre de molécules de cellobiose présentes dans la macromolécule. Le cellobiose, dimère du glucose est le motif répétitif du polymère. Les 2 molécules de glucose du cellobiose ne sont en effet pas associées sous une forme symétrique. Le glucose n'est donc pas le chaînon unitaire du polymère.

L'une des extrémités du polymère est réductrice et l'autre non. L'unité de cellobiose a une dimension fixe de 10,3 Å. Le DL de la cellulose varie selon les plantes. Il est de l'ordre 9000 pour le chanvre, 10000 pour le coton et peut dépasser 25000 pour certaines algues. On considère que la cellulose de bagasse est constituée de 2000 à 3000 unités de cellobiose (Setty *et al.* 1995).

A l'état natif, les chaînes de cellulose sont orientées en arrangement parallèle définis par les extrémités réductrices et non réductrices du polymère. L'empilement donne des

¹ Canal Point : Station de création variétale de Floride.

² D. Sabatier, CIRAD modélisation.

microfibrilles dont le diamètre varie selon l'emplacement dans la paroi cellulaire ([Ch.III-§51](#)). Les diamètres les plus importants se trouvent dans la paroi secondaire ([Figure 10](#)).

La fibre élémentaire de cellulose présente un arrangement linéaire avec des alternances de parties cristallines séparées par des parties amorphes ([Figure 6](#)).

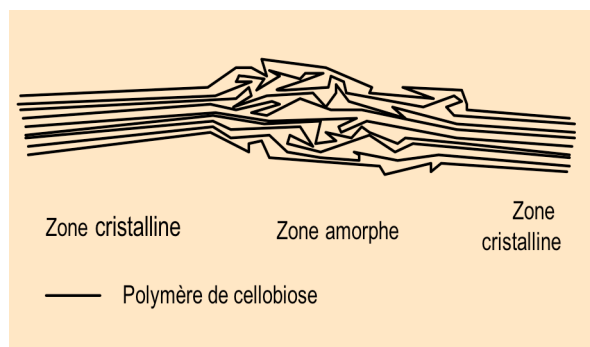


Figure 6 : Fibre élémentaire de cellulose

Cette structure fibrillaire est la conséquence des nombreux groupes hydroxyles qui créent des ponts hydrogènes intermoléculaires et intramoléculaires. Les forces structurales sont ainsi :

- Les liaisons hydrogènes intramoléculaire entre les hydroxyles de deux glucoses successifs, qui équilibrent un arrangement linéaire à la macromolécule de cellulose.
- Les liaisons hydrogènes intermoléculaire entre les glucoses de deux macromolécules proches, qui ont pour conséquence des empilements parallèles qui donnent une structure cristalline.
- La présence de molécules d'eau dans le milieu qui crée des liaisons hydrogène supplémentaires. Les perturbations locales de l'arrangement géométrique cristallin qui en résulte peut expliquer en partie la présence de zones amorphes.

L'ensemble constitue la structure microfibrillaire de la cellulose « native » aussi appelée cellulose I. Cette structure n'est pas modifiée par les procédés d'extraction de la fibre en milieu acide. Par contre le traitement à la soude, aussi appelée mercerisage, modifie l'arrangement. Il en résulte une structure mal définie appelée cellulose II, qui serait notamment caractérisée par des associations antiparallèles des macromolécules.

[Hess et al. \(1941\)](#) proposent une représentation de l'agencement des microfibrilles qui semble toujours d'actualité. Nous avons schématisé cette structure [Figure 7](#)¹. On y retrouve une alternance des parties cristallines et des zones amorphes avec un pas de l'ordre de 15 nm. Cette régularité d'alternance semble indiquer que les zones amorphes ne sont pas dues au hasard de la présence de molécules d'eau mais sont le fruit d'une organisation structurale. Nous n'avons pas trouvé de références bibliographiques expliquant le phénomène.

[Bhattacharya et al. \(2008\)](#) ont caractérisé la structure des microfibrilles de cellulose de bagasse de canne à sucre. L'étude des microfibrilles regroupant ces nanoparticules révèle une échelle de 30 nm, proche des 25 nm du modèle de [Hess et al. \(1941\)](#). La partie cristalline s'étend sur 75 à 100 nm soit entre 150 et 200 molécules de glucose, chacune occupant 0,5 nm dans l'axe de la macromolécule. Les conditions d'extractions des nanofibrilles développées par les auteurs ne modifient pas la longueur de la partie

¹ Représentation schématique de [Hess](#) d'après la reproduction de [Bhattacharya et al. \(2008\)](#).

cristalline, mais ne permettent pas d'en disperser la totalité et laisse des agglomérats (*bundle*). Les régions amorphes beaucoup plus fragiles sont dispersées.

Le degré de polymérisation stabilisé (LODP : *Level-off degree of polymerisation*¹⁾ des nanofibres de différentes origines végétales (El-Sakhawy et Hassan, 2006) indique que les microcristaux provenant de la bagasse de canne à sucre sont les plus longs (Tableau 11). Les microfibrilles du commerce utilisées comme témoin² par les auteurs avaient un LODP de 317 comme la bagasse dégradée à l'acide chlorhydrique.

Tableau 11 : Degrés de polymérisation stabilisé de microfibrilles cellulosiques

Acide	Bagasse	Paille de riz	Tige de coton
HCl	317	237	245
H ₂ SO ₄	299	224	252

La partie amorphe des microfibrilles est plus réactive aux attaques chimiques que la partie cristalline. Yoshida et al. (2008) montrent que l'effet d'une cellulase sur la cellulose amorphe de *Miscanthus sinensis* est plus rapide que sur la partie cristalline. Les auteurs démontrent aussi que la vitesse de dégradation de la cellulose par des cellulase et β -glucosidase du commerce est inversement proportionnelle à la longueur de la chaîne cristalline.

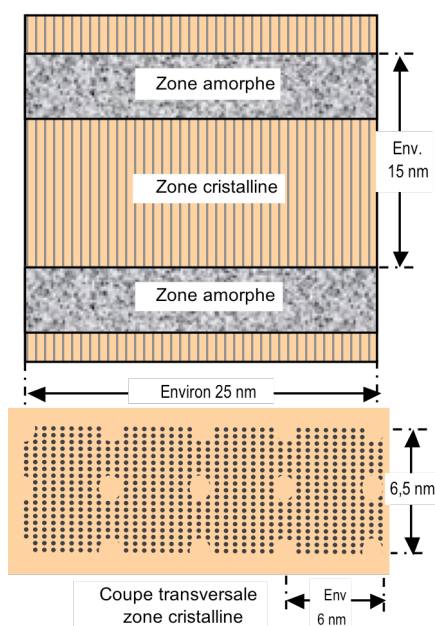


Figure 7 : Microfibrille de cellulose

La cellulose n'est pas soluble dans l'eau. Les procédés de dissolution, qui ne modifient pas sa structure, sont limités et complexes. Ils se déroulent en plusieurs étapes, mettent en jeu plusieurs agents chimiques, et demandent des apports énergétiques pour rompre les liaisons hydrogènes (chauffage à 150° C).

312. Rôle et intérêt

La cellulose confère souplesse et résistance aux tissus de soutien non lignifiés (collenchyme). Elle joue le rôle d'armature de renforcement dans le cas des tissus lignifiés. Elle est souvent comparée au treillis métallique du béton armé. Ses caractéristiques sont

¹⁾ Obtenu après dégradations acides jusqu'à stabilisation de la longueur

²⁾ Standards de références disponibles dans le commerce.

l'insolubilité, la rigidité, l'inertie chimique et une bonne résistance à la dégradation biologique. La cellulose est en outre hydrophile, caractéristique qui explique que, contrairement aux lignines, on la retrouve dans les tissus vivants.

Les dérivés chimiques de la cellulose sont extrêmement nombreux. Ils couvrent un éventail d'usage considérable du domaine de la chimie verte. Ils font sans cesse l'objet de nouvelles recherches de valorisation (Satge, 2002).

La cellulose est le composant de base de toutes les applications textiles. Les procédés industriels qui conduisent à la fabrication de matériaux non-tissés à base de bagasse tendent à extraire tout ou partie de la cellulose de la fibre.

Il existe aujourd'hui un intérêt croissant pour la cellulose microcristalline. Ces nano particules biodégradables sont largement employées dans l'alimentation, la cosmétique et l'industrie pharmaceutiques pour ses caractéristiques de rétention d'eau, de stabilisant de suspension, d'agent de renforcement et de compaction... (*filler/binder, binding capacity, tableting*). Elles remplacent avec succès les ressources minérales employées dans le passé (essentiellement argiles) dans la synthèse de matériaux.

Les microfibrilles de cellulose de canne à sucre ont été étudiée dans le cadre de leur utilisation pour renforcer les composites à haute performante (*nano filler*). Ces fibres d'origine renouvelable présentent l'intérêt d'une faible densité. Des recherches récentes de Bhattacharya et al. (2008) montrent qu'il est aisé de créer des nanoparticules cellulosiques à partir de la bagasse¹ de canne à sucre, sans modification de la structure cristalline. La densité (*bulk and tapping density*) des nanofibres obtenues est comparable à celle des témoins usuels de l'industrie. Les auteurs montrent que le type d'acide utilisé pour préparer les nanofibres de bagasse conditionnent les propriétés du produit final (dimension, stabilité thermique, résistance à la rupture et cohésion).

32. Les hémicelluloses

321. Caractérisation du polymère

Les hémicelluloses sont des composés amorphes, qui constituent un vaste groupe de polyholosides hétérogènes composés majoritairement de pentoses (xylose et arabinose), de quelques hexoses (glucose, mannose, galactose et rhamnose) et d'une faible proportion d'acides uroniques (galacturonique et glucuronique).

Il s'agit de polymères de faible poids moléculaire soluble en milieu alcalin. Cette solubilité est utilisée pour caractériser le polymère. Les hémicelluloses sont aussi souvent définies par défaut comme « tout polysaccharide pariétal n'étant ni de la cellulose, ni une substance pectique² ». Dans le passé, les analyses ne mentionnaient pas toujours les hémicellulose, ou les regroupaient avec les substances pectiques.

Les hémicelluloses sont également solubles au milieu acide. Elles sont beaucoup plus faciles à dégrader que la cellulose. Ce dernier caractère est important. Il a un impact sur la stabilité des produits issus de la fibre qui contiennent des hémicelluloses, notamment lors des dégradations biologiques. Lors d'une étude sur la dégradation de la bagasse par des basidiomycètes de type pourriture blanche (*white-rot fungi*), Bressia et al. (1997) observent

¹ Pulpage conventionnel suivi d'une homogénéisation et d'une hydrolyse acide. Les auteurs obtiennent par cette méthode l'élimination totale des lignines et des hémicellulose.

² Polysaccharides acides ou neutres composés principalement de chaînes d'acide galacturonique seul ou associé à du rhamnose.

que les hémicelluloses constituent la source préférée (la plus accessible) d'énergie des champignons.

Parmi les études anciennes, [Davis et Philipps \(1941\)](#), procédant à l'hydrolyse acide d'hémicellulose de bagasse de canne à sucre, identifient de l'acide D-gluconique, du L-arabinose et du D-xylose dans des proportions molaires approximatives de 1 ; 0,87 et 21,9.

L'hémicellulose a une architecture complexe formée par un axe central sur lequel se greffe des chaînes latérales plus ou moins développées et branchées. [Du Toit et Van Bijon \(1984\)](#) ont montré que la bagasse de canne à sucre contenait deux fractions d'hémicellulose :

- La partie facilement hydrolysable (hémicellulose A) est un hétéroxylane, constituée essentiellement de glucose et d'arabinose qui forment des chaînes latérales plus ou moins branchées ;
- La fraction B forme l'axe central duquel partent les chaînes latérales. Plus résistante à l'hydrolyse, la fraction B apparaît à l'analyse comme une chaîne linéaire de L-arabino-D-xylane avec une petite quantité d'acide D-glucuronique.

Rapportée à la matière sèche, la bagasse d'origine sud-africaine ([Du Toit et Van Bijon, 1984](#)) contient 31,2 % d'hémicellulose. La partie linéaire centrale représentant 14,35 % du poids sec de bagasse et le reste (17,75 %) représentant les chaînes latérales.

Pour [Pessoa et al. \(1997\)](#), les pentoses composant les hémicelluloses de la bagasse de canne à sucre sont majoritairement du D-xylose (50 à 70 %) et du L-arabinose (5 à 15 %). D'autres études font état de 65 % de xylose dans les hémicelluloses de bagasse, correspondant à une teneur estimée de 270 mg/g de bagasse. Lors des hydrolyses complètes, seules 240 mg/g sont sous forme de xylose. Les 30 mg/g manquants ont été transformés en furfural.

A noter que l'hydrolyse totale de la bagasse conduit à des teneurs en glucose de 40 à 47 mg/g. L'origine du glucose retrouvé est incertaine car il existe lors des extractions chimiques plusieurs autres sources possibles de l'hexose qu'il est difficile de différencier :

- Hydrolyse partielle du saccharose résiduel de la bagasse,
- Hydrolyse partielle de la cellulose amorphe présente dans la bagasse ; ou
- Chaînes latérales des hémicelluloses.

L'extraction par différentes méthodes chimiques des hémicellulose de tiges de canne à sucre desquelles les cires de la cuticule des tiges ont été retirées (*dewaxed*) a conduit plus récemment [Sun et al. \(2004a\)](#) et [Sun et al. \(2004b\)](#) à reprendre la dichotomie précédente concernant les types d'hémicellulose. Les différences portent sur la fréquence des chaînes latérales (*branching*) et le poids moléculaire. Les fractions extraites par les auteurs sont principalement composées de L-arabino-(4-O-méthyl-D-glucurono)-D-xylane.

Le pourcentage de chaque sucre composant les chaînes d'hémicellulose montre une dominance du xylose dans la fraction A ([Tableau 12](#)).

Tableau 12 : Monosaccharides des hémicelluloses de la bagasse (%)

Monosaccharides	Fraction A	Fraction B	Résidus
Arabinose	5,96	19,73	13,70
Galactose	0,55	6,26	4,81
Xylose	81,83	51,44	59,07
Glucose	11,66	22,57	22,42

Une partie des pentoses se transforme en furfural lors de l'hydrolyse. Les petites quantités de galactose peuvent provenir des pectines présentes dans la bagasse. Certains auteurs font référence à la présence de rhammose en petite quantité.

321. Rôle et utilité

Les hémicelluloses des Poacées jouent un rôle particulier dans la réticulation des fibres. Elles ont la particularité d'être liées chimiquement entre elles et aux lignines. Les liens covalents sont constitués de ponts éther ou ester impliquant des acides hydroxycinnamiques et leurs dimères (*Ch.III-§422-b*) et les molécules d'arabinose du polymère. La structure ainsi formée est beaucoup plus résistante aux dégradations. Les hémicelluloses sont aussi reliées à la cellulose, mais par des liens non covalents (liaisons hydrogène ou liaisons hydrophobes de type Van der Waals).

Les hémicelluloses des plantes constituent la partie la plus accessible de la fibre à la biodégradation (*Ch.IV-§422*). Elles sont facilement solubles et plus ou moins instables. Notons cependant que les hémicelluloses des plantes herbacées, constituées essentiellement de pentoses, sont plus résistantes à l'hydrolyse acide que celles des plantes ligneuses. Cette différence peut être liée au degrés de ramification des chaînes et à leurs liaisons non covalentes avec la cellulose, et covalentes avec les lignines et entre elles (*Ch.III-§422-b*).

Cette faible stabilité chimique du polymère, explique que la présence d'hémicelluloses contribue à accroître la sensibilité à la dégradation et au vieillissement de produits finis comme le papier. Cependant, elles ne constituent pas toujours un résidu de l'extraction de la cellulose. *Shaikh et al. (2009)*, travaillant sur la fabrication d'acétate de cellulose à partir de bagasse de canne à sucre, montrent que les résidus de xylane¹ agissent positivement comme plastifiant et améliorent les qualités mécaniques du polymère obtenu.

Les hémicelluloses sont aujourd'hui un frein mais aussi un espoir pour la production d'éthanol de seconde génération² :

- Elles sont constituées majoritairement de pentoses dont le principal, le xylose est un carbohydrate difficilement fermentescible (*Ogier et al. 1999*). De nombreuses recherches visent à identifier des prétraitements chimiques ou à améliorer les souches de levure pour accroître le rendement en éthanol par fermentation du xylose ;
- Elles produisent par ailleurs, au cours de la délignification, des dérivés chimiques de la famille du furfural, qui inhibent les enzymes impliquées dans la fermentation des hexoses.
- L'utilisation de bactéries génétiquement modifiées (*Klebsiella oxytoca*) permet de produire 170 l d'éthanol par tonne de bagasse sèche, à partir des hémicelluloses (*Doran et al. 1994*). À titre de comparaison, la cellulose permet de produire 185 l d'éthanol.

Les hémicelluloses sont le composant majeur après les lignines des résidus d'extraction de la cellulose des fibres. Elles sont dissoutes par le milieu alcalin du pulpage et partiellement dégradées. Elles sont extraites de la fraction liquide (*spent liquor*) du pulpage par un solvant organique³ qui provoque leur précipitation. Elles sont ensuite récupérées par filtration sous

¹ 94% de cellulose et résidus impurs constitués d'environ 5% d'hémicellulose, de 0,2% de lignines et de 1% de cendres.

² Transformation en éthanol du saccharose de la canne à sucre auquel s'ajoute celle et des sucres extraits des polymères glucidiques : les hexoses de la cellulose et les pentoses des hémicelluloses.

³ Par exemple du méthanol.

pression ou par centrifugation. La grande majorité de la silice présente dans la liqueur de départ se retrouve dans le filtrat d'hémicellulose. Les lignines peuvent ainsi être utilisées comme combustible en évitant les problèmes mécaniques d'usure et de dépôts que posent la silice.

Les hémicelluloses sont largement valorisables en chimie. La bagasse, du fait de sa richesse en hémicellulose, et de la forte teneur en xylane de ses hémicelluloses (92 %), est une source particulièrement intéressante pour la production de furfural mais aussi de xylose.

La production de furfural à partir des hémicellulose de bagasse est très ancienne et concerne de nombreuses sucreries. Le furfural est produit par l'action d'un acide sur l'hémicellulose. Celle-ci s'hydrolyse et les pentoses formés se déshydratent ensuite pour former un aldéhyde aromatique en C5, le furfural. Les hémicelluloses sont analysées généralement par la mesure du furfural produit lors de cette hydrolyse acide.

La production du furfural par voie catalytique, moins polluante que la voie acide, est aujourd'hui préconisée (Mamann et al. 2008).

Le furfural est historiquement l'un des premiers dérivés chimiques produits par les sucreries de canne à sucre. Les rendements en furfural sont estimés à 170 kg par tonne de bagasse sèche. A titre de comparaison, le rendement en furfural rapporté à la tonne de matière sèche sont respectivement de 220 et 160 kg pour les épis de maïs et les tiges de maïs. Il se situe entre 150 et 170 kg pour les ligneux.

Le furfural est un synthon¹ (*building block*) polyvalent ouvrant à la synthèse de nombreuses molécules et produits chimiques importants (chimie furanique, résines et polymères, tensioactifs, solvant, plastifiants...). Il est aussi utilisé comme nématicide² de contact (Gerald et Kanana-Rodriguez, 1992). Soixante-dix pourcent du marché du furfural est destiné à la fabrication de résines.

La production de xylose par hydrolyse des hémicelluloses de bagasse tend à se développer. Un traitement hydrothermal de la bagasse permet d'obtenir des solutions à 78 % de xylose (Boussarsar et al. 2009). Le xylose est un sucre très utilisé dans l'industrie chimique, l'alimentation et l'industrie pharmaceutique.

De nombreuses recherches sont conduites aujourd'hui, dans le cadre du bioraffinage de la lignocellulose, pour mieux valoriser les hémicelluloses. C'est notamment le cas en France au niveau du pôle de compétitivité Champagne-Ardenne et Picardie (Ch.IV-§435).

4. Les lignines et phénols associés

41. Introduction

La lignine est un polyphénol qui constitue la seconde substance naturelle la plus abondante dans la nature après la cellulose. Elle représenterait environ 30 % du carbone organique de la biosphère. La lignine n'existe que dans les plantes vasculaires (Ptéridophytes, Angiospermes et Gymnospermes). On ne la retrouve ni chez les algues, ni chez les mousses³.

¹ Structure chimique de base à partir de laquelle on peut synthétiser un grand nombre de molécules apparentées.

² Crop guard (<http://www.cropguard.co.za/home.html>), nématicide à action fongicide manufacturé par illovo Sugar Ltd, Agriguard Compagny.

³ Des polyphénols ayant un rôle comparable à celui des lignines ont été identifiés chez les Bryophytes.

Bien que très importantes, les lignines sont encore mal connues car leurs structures complexes et aléatoires, rend problématique leurs caractérisations par des voies chimiques traditionnelles.

Les découvertes sur leurs biosynthèses sont récentes. Elles coïncident avec le développement de la biologie moléculaire adaptée à la génétique. Les progrès proviennent de l'étude de mutations de gènes impliqués dans la synthèse des lignines. Ils dérivent aussi des études de régulation, positive (*up-regulation*) ou négative (*down-régulation*), de l'expression de ces gènes par les méthodes de la génomique. Les supports de ces recherches sont des plantes modèles dont le génome a été largement étudié (*Arabidopsis thaliana*, *Nicotina tabacum*, *Populus tremula*, *Populus*, *Medicago*...).

La recherche française est très active dans ce domaine de pointe dont les retombées économiques potentielles sont considérables (Agro Paris Tech, INRA, Université de Haute Alsace, Université de Grenoble, CERMAV, CNRS, IRD...). Les informations que nous avons retenues dans cette étude ont pour objectif de caractériser les lignines des Poacées, les problèmes qu'elles posent pour la valorisation des fibres et leur intérêt comme coproduit des fibres.

Les informations relevant de la biochimie structurale et métabolique et de la régulation génétique de la biosynthèse des lignines sont incomplètes car trop techniques pour figurer dans cette note. Les acides phénoliques qui jouent un rôle important comme précurseur des lignines et comme renfort de la lignocellulose des Poacées sont évoqués avec les lignines car ils appartiennent à la même famille de métabolites secondaires.

42. Origine métabolique et composition

421. Le métabolisme secondaire des phénols

Les phénols et les polyphénols sont issus du métabolisme secondaire des phénylpropanoïdes, qui est spécifique au monde végétal. La phénylalanine, molécule initiale de ce métabolisme provient du métabolisme primaire, par la voie du shikimate¹ (Figure 8).

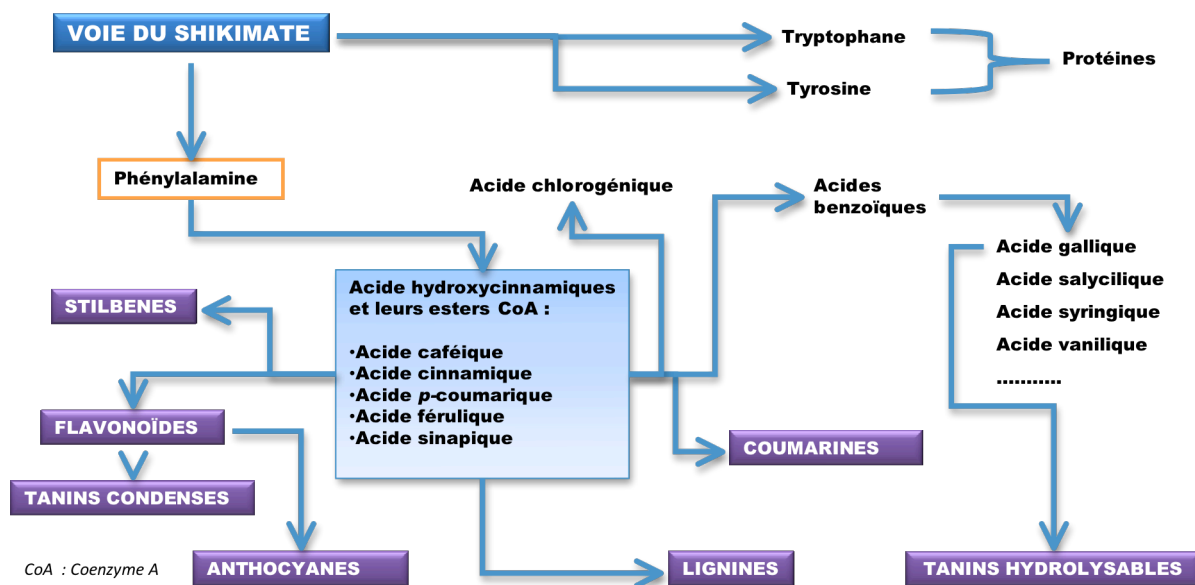


Figure 8 : Quelques molécules importantes du métabolisme des phénylpropanoïdes

¹ Métabolisme primaire produisant aussi la tyrosine le tryptophane.

Les composés phénoliques, dont plus de 8000 sont actuellement identifiés dans le monde végétal, proviennent aussi partiellement de la voie métabolique des acétates¹ (Dangles, SD), ou d'une combinaison entre ces deux voies². Ces métabolites secondaires ont une importance remarquable chez les végétaux, du fait de leur implication dans le développement et les interactions avec l'environnement.

Les lignines appartiennent à la famille des phénols, comme de nombreuses autres substances végétales économiquement importantes : tannins (ou tanins), flavonnes, anthocyanes... (Macheix et al. 2005). Colombo et al. (2006) ont identifié récemment 8 nouveaux anti-oxydants de la famille des flavones à partir de bagasse de feuilles et du jus de canne à sucre. Les acides hydroxycinnamiques ont également un intérêt économique croissant, notamment pour leurs propriétés anti-oxydantes.

Les lignines des Poacées ne peuvent être abordées sans évoquer les acides férulique et *p*-coumariques qui jouent un rôle spécifique dans la réticulation de la lignocellulose de cette famille de plante.

La voie des phénylpropanoïdes, que nous décrivons ici, ne donne qu'un aperçu réducteur et imprécis de la complexité du réel. Elle est encore mal connue, mais les avancées scientifiques de ces dernières années ont permis d'identifier des chemins métaboliques principaux de biosynthèse. Ceci marque une évolution importante sur la représentation qui était donnée dans les années 90. Le métabolisme des phénylpropanoïdes était alors considéré comme une grille dans laquelle les chemins étaient multiples et substituables (Mouille et al. 2006). Les chemins métaboliques sont cependant encore largement méconnus. Ainsi, Berrio-Serra (2007) étudiant des mutations sur *Arabidopsis*, constate qu'il existe des régulations croisées entre les effets des différentes mutations dont le résultat final n'est pas additif. De nombreux auteurs remarquent que le blocage d'une enzyme ne conduit pas toujours à la disparition de la molécule impliquée, mais à une diminution plus ou moins importante de sa synthèse. Il existe donc des voies de substitution qui ne sont pas toujours connues.

422. La biosynthèse des lignines

a. Constitution

La lignine est un biopolymère complexe de structure tridimensionnelle variable. Elle est exclusivement composée de dérivés de phénylpropanes³. La lignine est parfois qualifiée de squelette phénylpropanique (*phenylpropane skeleton*) des plantes (Petersen et al. 1999).

Tableau 13 : Les trois constituants des lignines

Unités	Abréviation	Monolignol	Méthoxyle	Liaisons condensées possibles
Hydroxyphénylepropane	H	Alcool p-coumarylique	0	3
Guaïacylpropane	G	Alcool coniférylique	1	2
Syringylepropane	S	Alcool sinapylique	2	1

Trois alcools phénylpropanoïques, ou monolignols (Tableau 13), sont impliqués dans la construction du polymère. Ils se différencient par le nombre de leurs groupes méthoxyles (-OCH₃) en position 3 et 5 du noyau phénolique. Cette méthoxylation est importante. Elle

1 La voie de l'acide acétique (acétyl coenzyme A) conduit aux acides gras, aux terpènes et aux composés phénoliques.

2 La voie combinée acide shikimique/acide acétique conduit aux flavonoïdes et aux xanthones (puissants antioxydants)

3 Molécules disposant de 9 atomes de carbone

explique en effet le niveau de réactivité chimique des lignines.

Un processus de polymérisation déshydrogénative conduit aux trois unités désignées dans la bibliographie par leur abréviation H, G et S.

À noter que les unités H sont peu représentées dans le monde végétal. On les retrouve essentiellement chez les monocotylédones dont les lignines sont caractérisées de HGS. L'association de ces trois unités, en nombre et proportion variable, forme les lignines (*Figure 9*).

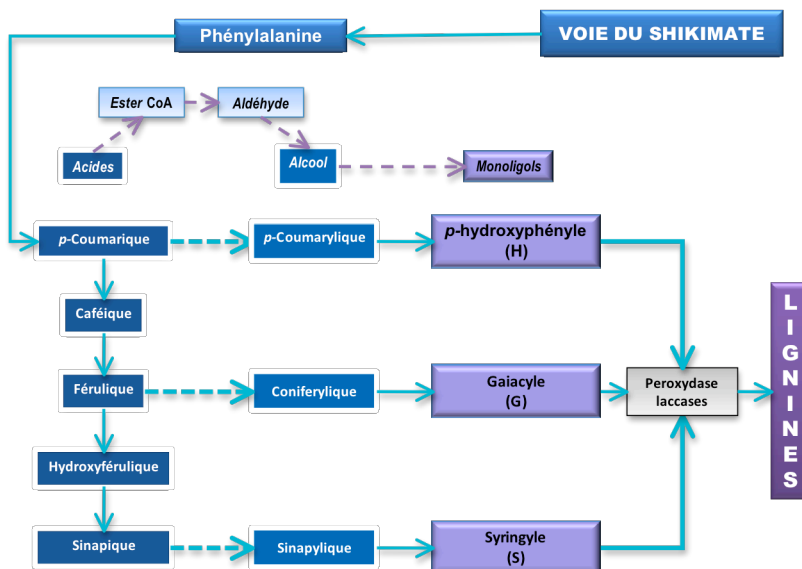


Figure 9 : Les lignines dans le métabolisme des phénylpropanoïdes

Les processus de couplage des monolignols et d'association des unités commence tout juste à être connu. Il débute par des actions enzymatiques (laccases, peroxydases) puis par des liaisons chimiques directes.

Deux modèles de polymérisation se sont longtemps opposés pour expliquer la grande variabilité des lignines. L'un, largement remis en cause, met en jeu un contrôle biochimique du processus qui serait ordonné et ne devrait donc rien au hasard. Le second, qui apparaît dominant aujourd'hui, postule pour une polymérisation non déterminée et souple, guidée par la disponibilité en monomères et les lois de la chimie. Ce dernier modèle propose une polymérisation basée sur des mécanismes chimiques *radicalaires*¹ originaux, voire uniques, dans le domaine des macromolécules (Monties, 2005).

Ces mécanismes radicalaires mettent en jeu des électrons non appariés. Ils créent des liaisons entre des groupements réactifs terminaux « dormants », séquestrés, qui sont réactivés lorsque les conditions physico-chimiques sont favorables à l'agrégation. Le pilotage du couplage, en dehors de l'initiation du processus, ne serait donc pas de nature enzymatique mais purement chimique.

Le résultat est un ensemble de structures réticulées complexes et aléatoires. Cette origine aléatoire est toujours au centre de nombreux débats (Monties, 2007).

Le couplage radicalaire met en jeu une proportion de liaisons inter-monomérique condensées² qui varient selon le monolignol. Les carbones méthoxylés en position 3 du

¹ Les mécanismes radicalaires sont caractérisés par trois séquences : l'initiation, la propagation et la terminaison au cours de laquelle des inhibiteurs stabilisent les groupements réactifs.

² Liaison C-C

noyau phénol de l'unité G ou 3 et 5 de l'unité S, ne sont en effet pas disponibles pour être engagés dans une telle liaison. Ainsi, les lignines des conifères, qui présentent une forte proportion d'unité G (**Tableau 14**), sont beaucoup plus condensées que les lignines des angiospermes riches en unités S. Ces dernières seront plus riches en liaisons non condensées¹.

Il en résulte des conséquences sur la dégradabilité des lignines. [Chang et Sarkonen \(1973\)](#) confirment le phénomène en indiquant que parmi les feuillus et de conifères, les espèces les plus faciles à délignifier par procédé Kraft sont celles qui sont les plus riches en unité S.

[Groote -De et al. \(1992\)](#) ne retrouvent pas les mêmes proportions des 3 monolignols dans la canne à sucre que dans les autres Poacées². Les auteurs indiquent en effet la présence des 3 unités à un niveau à peu près équivalent. Les lignines de canne à sucre sont de type **HGS**, avec 31% de H, de 28% de G et de 41% de S. Elles présentent donc une teneur en H, supérieur à celle des autres graminées citées. Cette caractéristique est intéressante dans la mesure où les unités H non méthoxylées conduisent à une fréquence importante de liaisons condensées. Cette richesse particulière en unité H semble différencier la canne à sucre des autres monocotylédones.

En dehors de la variabilité indiquée dans le **Tableau 14**, dont une partie des données sont adaptées de [Mouille et al. \(2006\)](#), il existe une variabilité structurale et chimique des lignines :

- À l'échelle de la plante (zone cellulaire, paroi cellulaire, tissu, stade de développement, saison, état sanitaire...) ;
- Entre variétés d'une même espèce ;
- Entre espèces d'une même famille...

Les fibres de type primaire³ des monocotylédones sont moins lignifiées que celles de types secondaires⁴ qui caractérisent les dicotylédones. Pour les plantes herbacées, l'unité H est peu représentée et les unités G et S sont en quantité équivalente (**Tableau 14**).

Tableau 14 : Caractéristiques des lignines et divergence des plantes terrestres

Taxonomie		Évolution ⁵	Plantes	H	G	S	AF	AC
Bryophytes		- 415 MA	Mousse	Non	Non	Non	Non	Non
Gymnosperme		- 300 MA	Conifères	5	95	Trace	Non	Non
Angiosperme	Dicotylédones	- 110 MA	Feuillus	Trace	14-66	34-86	Non	Non
	Monocotylédones	Un peu postérieur mais mal déterminé	Poacées	Faible	oui	oui	oui	oui
			Maïs (tiges)	4	35	61	4	3
			Blé (paille)	5	49	46	oui	oui
			Riz (paille)	15	45	40	oui	oui
			Canne à sucre	31	28	41	1,29*	1,76*

MA = million d'année ; AF = Acide férulique ; AC = Acide p-coumarique. *% de bagasse ([Feng et al. 2005](#))

Les lignines sont d'autant plus sophistiquées que les plantes sont évoluées. Les lignines G les plus simples sont progressivement complexifiées par des lignines diméthoxylées S. On

¹ Liaison C-O-C (éther, alkyl, aryl).

² Nous n'avons actuellement pas d'informations sur les contenus en monolignols d'autres plantes appartenant au complexe Saccharum.

³ Générées par l'apex.

⁴ Générées par un cambium fabriqué par l'apex.

⁵ Les « paléo-informations » indiqués dans la colonne du tableau sont adaptées de [Carels \(2000\)](#).

retrouve par ailleurs deux acides hydroxycinnamiques, l'acide *p*-coumarique¹ et l'acide férulique dans les plantes les plus évoluées que sont les monocotylédones. Ces deux acides phénoliques, qui sont des précurseurs des lignines H et G, jouent également un rôle fondamental dans les liaisons des lignines avec les polymères glucidiques des Poacées.

b. Rôle et intérêt des acides phénoliques

Les Poacées sont au sommet de l'évolution (*Tableau 14*). Elles sont apparues postérieurement aux dicotylédones mais à une période mal définie faute de fossiles. L'évolution leur a fait bénéficier d'un maintien des caractéristiques mécaniques de leur squelette, malgré une diminution de la teneur en lignines ([Mouille et al. 2006](#)). Ce résultat provient d'un renforcement de la cohésion de la lignocellulose par des liens chimiques nouveaux, entre des acides hydroxycinnamiques et l'hémicellulose. Cette évolution est d'autant plus remarquable que la synthèse des lignines requiert beaucoup d'énergie à la plante.

Les Poacées, pauvres en lignines, ont pour caractéristiques spécifiques d'être renforcées par des liaisons covalentes avec des polysaccharides et des acides hydroxycinnamiques mais aussi avec des glycoprotéines et des tannins ([Monties, 1989](#)).

De nombreuses recherches sont conduites actuellement sur ces liaisons, ainsi que sur les liaisons entre les lignines et les autres polymères glucidiques². La valorisation de la lignocellulose implique en effet son bioraffinage, c'est-à-dire la connaissance des liaisons à rompre pour séparer les constituants à moindre coût en minimisant l'impact écologique. Les avancées actuelles dans la connaissance de la nature et de la variabilité des liaisons sont surtout le fait de l'étude de la digestibilité de la lignocellulose du maïs³. Elles mettent en évidence l'importance des mécanismes génétiques impliqués dans le métabolisme des phénylpropanoïdes et la variabilité exploitable ([Riboulet et al. 2009](#) ; [Barrière et al. 2008](#)).

[Feng et al. \(2005\)](#) trouvent dans la bagasse de canne à sucre qu'ils ont échantillonnée 1,76 % d'acide *p*-coumarique et 1,29 % d'acide férulique. Les auteurs montrent par ailleurs que plus de 70 % de l'acide *p*-coumarique est engagé par des liens ester avec les composantes des parois cellulaires et surtout les lignines. La moitié de l'acide férulique est estérifiée avec les hémicelluloses alors que le reste est estérifié avec l'oxygène phénolique des lignines. L'acide férulique est aussi présent sous forme de dimère (acide diférulique) chez les monocotylédones. Bien que présent en faible quantité, l'acide diférulique a un rôle important dans la structure de la fibre. Il crée en effet des ponts croisés avec les polysaccharides, diminuant ainsi la solubilité et la biodégradabilité des hémicelluloses ([Ford et Harley, 1990](#)). Pour [Besle et al. \(1993\)](#), ces acides phénylpropanoïques constituent une barrière autant physique que chimique aux enzymes microbiennes.

A noter que les Poacées en C4 tendent à avoir un niveau plus élevé d'acides hydroxycinnamiques dans les parois cellulaires que celle des C3.

Les acides phénoliques sont l'objet d'un intérêt économique croissant, lié à leurs utilisations potentielles dans des domaines aussi variés que l'alimentation, la santé et l'industrie pharmaceutique⁴ ainsi que les cosmétiques.

¹ Acide parahydroxycinnamique appelé le plus souvent acide coumarique. L'isomère en position para étant le plus fréquent.

² Notamment par l'Equipe lignines et tanins : structure, assemblage et valorisation de l'INRA Agro Paris Tech.

³ Essentiellement les équipes de l'INRA Lésignan.

⁴ L'acide férulique est métabolisé par l'organisme humain. On lui prête des propriétés physiologiques multiples, notamment : anti-oxydant, antiseptique, anti-inflammatoire, anti-thrombose et anti-cancer.

L'extraction de l'acide férulique est étudiée notamment sur les résidus de brasserie (Mussatto *et al.* 2007), sur la bagasse de canne à sucre (Al-Arni *et al.* 2007 ; Ou *et al.* 2007) ou sur d'autres cultures comme le blé, le maïs et même le lin (Buranov *et Mazza*, 2009).

Ou *et al.* (2009) proposent une méthode d'extraction industrielle de l'acide *p*-coumarique¹ de la bagasse de canne à sucre.

Payet *et al.* (2006) ont fait un inventaire des composés phénoliques anti-oxydant dans les produits manufacturés² issus de la filière canne à sucre à La Réunion. La bagasse ne figure donc pas dans les fractions analysées. L'étude montre que les composés phénoliques anti-oxydants se retrouvent surtout dans les mélasses.

43. Principales caractéristiques

431. Propriétés physico-chimiques et applications

Les lignines constituent une véritable matière plastique naturelle, qui se dépose dans la plante par un processus qualifié d'imprégnation ou d'incrustation. À titre d'image, les lignines et les hémicelluloses sont le ciment dont l'armature est constituée par les microfibrilles de cellulose.

Les lignines sont des molécules hydrophobes³. Leur pouvoir calorifique comparé à celui d'autres polymères végétaux, est élevé. Il correspond à masse équivalente à 60% de l'énergie du pétrole. Certains auteurs considèrent que la lignine a une valeur énergétique équivalente à celle du charbon (McLaughlin *et al.* 1996). Cette caractéristique provient d'une teneur élevée en carbone (65%). Elle s'accompagne d'une bonne stabilité thermique.

Les lignines sont très résistantes à la compression. On les retrouve dans le sclérenchyme, qui assurent la protection, le soutien et la conduction de la sève brute (xylène) et dans les tissus adultes. Les cellules des tissus lignifiés perdent leur cytoplasme. Les caractères hydrophobes et rigides du polyphénol, qui permet la circulation de sève et le maintien, ne permet pas en effet les échanges hydriques et la croissance. La lignification peut donc être assimilée à une véritable apoptose cellulaire des tissus dédiés au soutien et à la conduction de la sève brute.

Les lignines sont très résistantes à la dégradation. La dégradation « naturelle » de la lignocellulose résiduelle des cultures et généralement longue. Elle s'explique par la sensibilité des lignines aux UV (entre 300 et 400 à 500 nm), ainsi que par des dégradations enzymatiques dues à des phénol-oxydases et des laccases que fabriquent certains champignons lignolytiques.

La sensibilité aux UV des lignines, leurs confèrent *in fine* un rôle de protection des tissus vivants de la plante contre les rayonnements UV. Cette sensibilité est attribuée à une molécule, la dibenzodioxocine que l'on a découvert récemment dans la lignine des fibres lignocellulosiques (Hoareau, 2005).

Les lignines de la bagasse de canne à sucre sont moins photodégradables que celles ces espèces ligneuses du fait d'un contenu plus élevé que d'autres lignines en unité H, qui est caractérisée comme plus stable que les autres unités à l'action des UV (Ruggiero *et al.* 2005 ; Hoareau, 2005). Cette photorésistance fait de la bagasse de canne à sucre une bonne ressource de base pour la fabrication de matériaux d'extérieur.

¹ Parmi ses nombreux rôles, on pense que cet acide joue un rôle dans la régulation immunitaire humaine.

² Sucre, jus, sirop, massecuite et mélasse.

³ L'hydrophobie explique les qualités protectrices contre les agressions pathologiques et le fait que les cellules lignifiées soient des cellules mortes.

La sensibilité des lignines aux UV est à l'origine des jaunissements au cours du vieillissement des papiers. Les procédés de pulpage s'accompagnent d'une multiplication de sites photophores. Les lignines doivent donc être prises en compte dans l'industrie papetière.

La trituration thermomécanique conserve la lignine. Elle produit des pâtes pour des papiers à faible durée de conservation (journal...).

Dans le pulpage thermochimique (le plus courant est le procédé Kraft à la soude), les lignines résiduelles colorent les pâtes et imposent leur blanchiment¹ par traitements chimiques onéreux et polluants. Les besoins chimiques pour amener une pâte à un niveau recherché de coloration (blancheur) sont estimés à partir d'un indice Kappa² (*Kappa number*), nombre variant de 1 à 100 qui est une estimation de la lignine résiduelle. L'indice Kappa caractérise l'origine de la lignocellulose. Pour la bagasse de canne à sucre, on estime en Iran (Rezayati-Charani et al. 2005), que la production moyenne de 15 t/ha de bagasse à 50 % d'humidité permet de produire 4 t/ha de pâte avec un indice Kappa de 35.

Certains auteurs considèrent que les lignines ont un rôle de stockage des résidus métaboliques toxiques que produisent les plantes (phénols). Les lignines de la canne à sucre ont un faible poids moléculaire, qui confère aux fibres une moindre solidité que celles des ligneux. Cette caractéristique est intéressante car elle génère des économies au niveau des procédés mécaniques et chimiques de traitement industriel des fibres (Almazan et al. 2001).

Le rôle des lignines dans la liaison entre les fibres de cellulose en fait un bon candidat comme matière de charge-dilution (*extender*) dans les composites, sans détérioration significative des qualités mécaniques. Cet usage est limité par la faible réactivité chimique des lignines. Cependant, les lignines extraites de la canne à sucre ont une réactivité chimique remarquable qui les rend intéressante pour la synthèse d'adhésifs naturels dans la fabrication de panneaux (Lewis et lantzy, 1989). Ces caractéristiques sont liées à une plus faible substitution des carbones 3 et 5 des dérivés phénoliques. Cette plus grande réactivité chimique des lignines de canne à sucre par rapport à celles des feuillus et des conifères est confirmée par des études conduites en Australie, qui montrent une faible substitution des noyaux aromatiques en position ortho (Doherty et al. 2007). Pour Van Der Klashorst et Strauss, (1986), les lignines de bagasse dégradées par le procédé de pâte chimique à la soude (*soda bagasse*) contiennent environ 0,7 site réactif par groupe chimique³, soit le double des lignines standard. Frollini et al. (1994), indiquent la présence de 0,63 sites hydroxyphénole réactifs par unité de phénylpropane et 1,05 positions accessibles, ce qui conduit bien à 0,7 (0,66) centres réactif à comparer avec les 0,3 centres réactifs des lignines provenant du pin.

Des essais de renforcement de fibres de sisal par apport de lignines issues de bagasse de canne à sucre et de pin, montrent la supériorité des premières en matière de réduction du caractère hydrophile de la fibre et de renforcement de la matrice fibre phénol. Ce résultat provient d'un taux supérieur de méthylation (Megiatto et al. 2008).

Les lignines de canne à sucre sont donc une source économique et très performante d'adhésifs industriels (Van Der Klashorst et al. 1985). Les auteurs soulignent aussi l'intérêt de ces lignines pour la fabrication d'enduits (*coating*) protecteurs constituant une barrière hydrophobe, ainsi que pour élaborer des biocomposites comme les stratifiés de bagasse (*bagasse laminate*). Park et al. (2008) montrent l'intérêt des résines PF⁴ substituées à 30 %

¹ Le blanchiment est une délignification complémentaire.

² Son estimation est basée sur l'usage du permanganate de potassium.

³ Unités de phénylpropane. De nombreux auteurs caractérisent les lignines par ces unités en C9 issus de la dépolymérisation des molécules d'origine.

⁴ Formaldéhyde du phénol. Une des première résine utilisée, connue sous le nom de bakélite.

par des lignines extraites de bagasse, comme enduit hydrophobe pour les substrats de type carton (*cardboard*). Il est envisageable de substituer les phénols des résines PF par ceux qui sont issus de la lignine (*lignin PF resins*). La substitution partielle de la résorcine (diphénol) par des lignines de bagasse extraites par un procédé acétique¹ (*acetosolv process*) ne pose pas de problème technique. Hoareau et al. (2006) ont montré qu'il était possible de fabriquer des panneaux de fibres 100% bagasse de canne à sucre, en substituant la totalité des résines phénoliques par de la lignine extraite de la bagasse et en utilisant la bagasse comme source de fibre.

D'une manière plus générale, la majorité des résines issues du pétrole sont des composés phénoliques substituables par des lignines.

Un autre usage est signalé par Sales et al. (2007). Les auteurs ont mis au point un procédé industriel pour produire en continue de l'aldéhyde à partir de lignines issues de la délignification de la bagasse de canne à sucre.

432. Importance biologique des lignines

a. Enherbement

Samprieto et Vattuone (2006) montrent que les composés phénoliques, issus du lessivage des pailles de canne à sucre, ont un rôle de régulateur de croissance. Les molécules actives identifiées, qui sont les acides vanillique, syringiques et férulique, stimulent la croissance racinaire des plantes testées jusqu'à certaines concentrations. Au delà, ils inhibent l'élongation racinaire.

L'échantillonnage au champ des auteurs montre une grande variabilité dans la couverture de paille de canne à sucre, avec une variation de 72 à 764 g/m² de paille sèche. Cette variabilité de couverture, explique en partie l'effet limité du couvert de paille de canne contre l'enherbement (Christofoletti et al. 2007 ; Manechini et al. 2005).

Par contre, les auteurs estiment que les concentrations mesurées d'acides phénoliques n'expliquent pas en totalité la forte activité inhibitrice des lixivats de paille de canne à sucre. L'acide vanillique est le plus efficace, suivi de l'acide férulique et en dernier lieu de l'acide syringique. Ces véritables phytotoxines inhibent la perméabilité membranaire et dépriment l'activité métabolique des racines (Samprieto et al. 2007).

Viator et al. (2006), ajoutent dans la liste des composés allélopathiques, des acides benzoïques aux acides phénoliques précédemment évoqués. Ils décrivent également des effets autotoxiques. Ils confirment l'effet d'hormèse (*hormetic*) décrit par Samprieto et Vattuone (2006), en identifiant un accroissement de la germination des boutures de 45 % aux faibles doses et un ralentissement de croissance touchant les feuilles aux fortes doses.

Les travaux récents de Singh et al. (2009) montrent que d'autres molécules que les acides hydroxycinnamiques, provenant d'extraits aqueux de feuilles de canne à sucre, ont aussi des effets allélopathiques et autotoxiques. Ces molécules, appartenant à la famille des acides hydroxamiques², très répandues chez les Poacées, sont qualifiées par les auteurs par les acronymes DIMBOA et MBOA³.

Ces effets autotoxiques et allélopathiques sont à prendre en compte dans la conception des itinéraires techniques canne à sucre (brûlis, exportation des pailles, désherbage, aptitude aux rotations...). L'effet du paillis résiduel sur la production pourrait être en particulier un sujet de recherche à développer.

¹ Pulpage par un mélange d'acide acétique et d'eau porté à ébullition avec un apport d'acide chlorhydrique agissant comme catalyseur (faible concentration comprise entre 0,05 et 0,15% de la masse de liqueur acétique).

² Acides surtout connus pour leurs propriétés chélatrices.

³ Nous ne citons pas l'appellation chimique de ces molécules qui n'offre aucun intérêt dans ce contexte.

b. L'azote

[Arencibia et al. \(2008\)](#) mettent en évidence l'intérêt des composés phénoliques lors de la micropropagation de la canne à sucre, au sein de bioréacteurs avec immersion temporaire¹. Les composés phénoliques accroissent le nombre de racines fonctionnelles. Ils facilitent également la colonisation précoce des racines par des microorganismes endophytes fixateurs d'azote (*Gluconacetobacter diazotrophicus*) dont l'intérêt pour la fertilisation azotée de la canne à sucre fait l'objet de nombreuses recherches ([Pouzet et Lejars, 2008](#)).

Ces résultats recourent les connaissances actuelles sur la fixation symbiotique de l'azote des légumineuses. Des enzymes produites par la plante à partir de précurseurs appartenant à la famille des flavonoïdes permettent le fonctionnement du microorganisme fixateur qui ne les synthétisent pas.

Ces liens entre les composés phénoliques et la fertilisation azotée sont particulièrement intéressants dans une optique de réduction des apports minéraux à la culture. Ils pourraient être en partie à l'origine de la variabilité des résultats obtenus en conditions de culture ([Pouzet et Lejars, 2008](#)).

c. Les pathogènes

La grande plasticité et la variabilité des couplages chimiques entre les constituants implique un manque de régularité spatial et chimique du polymère. Ces caractéristiques sont considérées comme un avantage dans la protection contre le pathogène. Cette irrégularité rend en effet difficile l'adaptation des systèmes enzymatiques hydrolytiques des champignons et des insectes. Cette variabilité structurale constitue ainsi une barrière efficace contre les agressions biotiques ([Hatfield et Vermerris, 2001](#)).

Des expériences conduites par [Bhuiyan et al. \(2009\)](#) montrent que la biosynthèse des lignines joue un rôle important dans la défense du blé contre des pathogènes. Chez la canne à sucre, des flavonoïdes sont identifiés par [Lloyd et Pillay \(1980\)](#) comme inhibiteurs de croissance des téliospores de charbon (*Ustilago scitaminea*). [Legaz et al. \(1998\)](#) montrent que la résistance au charbon de la canne à sucre est liée à la production de trois types de polyamines² associés à des acides phénoliques spécifiques : syringique, *p*-coumarique, caféique, férulique et chlorogénique.

Les travaux de [Santiago et al. \(2009\)](#) portant aussi sur la comparaison de variétés de canne à sucre résistantes et sensibles au charbon³ (*smut sporidia*) montrent que la résistance est associée à un accroissement de trois acides hydroxycinnamiques (férulique, caféique et syringique). Ces acides sont supposés multiplier les liaisons entre les parois. Ils forment ainsi une barrière à la diffusion de la maladie. Les auteurs émettent l'hypothèse que le processus serait activé par un niveau seuil d'acide *p*-coumarique.

d. Le stress et les bio-agressions

Le processus de lignification, qui module à la fois la quantité de lignine et la qualité de la lignine synthétisée est multifactoriel. Pour une plante donnée, la variabilité dépend de la variété, du type de tissu mais également du type cellulaire et pour une même cellule, de la paroi cellulaire. Elle varie également en fonction du stade de développement et de maturation de la culture, de la floraison et des conditions environnementales.

La lignification dépend aussi des facteurs de stress qui affectent la croissance (pollution,

¹ Procédé performant pour produire du matériel végétal exempt de pathogènes pour l'agriculture.

² Selon les formes d'extraction (libre, insoluble en milieu acide ou combiné).

³ *Sporisorium scitamineum*.

stress hydrique, attaques parasitaires...) et des contraintes physiques comme la verse. Il existe en effet des voies inductibles de biosynthèse, qui permettent à la plante d'isoler un site d'infection ou de blessure, par des lignines enrichies en liaisons condensées¹, plus difficilement dégradables que les lignines habituelles (Dixon et Paiva, 1995 ; Lange et al. 1995). Le brunissement qui apparaît lors des blessures de la plante (*tissue-browning*) provient d'une accumulation de composés phénoliques qui s'oxydent (Ke et Salveit, 1989).

Comme exemple de réaction au stress, nous pouvons citer les études de Cabané et al. (2004). Les auteurs ont démontré que les peupliers exposés à des taux d'ozone mimant la pollution atmosphérique surproduisent des lignines de stress à la résistance renforcée dans leurs feuilles. De même, les analyses sur maïs montrent que la sève brute s'enrichit en acides phénoliques (coumarique, caféique et férulique) lors de périodes de stress hydrique. Alvarez et al. (2008) émettent l'hypothèse d'une modification de la biosynthèse des lignines en réponse au stress.

Plus généralement, les stress subit par la plante, de nature biotique (agents pathogènes, blessure, symbiose..) ou abiotique (lumière, rayonnements U.V., température, carences, contraintes mécaniques, pollution...) agissent sur le métabolisme secondaires des phénylpropanoïdes. Des composés phénoliques de défense, dont nous ne donnons qu'une liste très partielle, s'accumulent alors dans la plante où ils agissent :

- Directement :
 - Comme anti-microbien et protection contre les herbivores (phytoalexine...) ;
 - Comme anti-oxydant pour détoxifier les radicaux toxiques (*radical scavenging*) (acide férulique...) ;
 - Comme signal dans les mécanismes de résistance (acide salicylique...) ;
 - En réaction aux attaques d'herbivores (acide chlorogénique...) ;
 - En réponse au froid ou à une carence nutritionnelle (anthocyanines...);
 - En réponse à un stress hydrique (acides hydroxycinnamiques) ;
- Indirectement par la formation de lignine « condensées » de stress.

Ces phénols joueraient aussi un rôle pour déclencher la synthèse d'autres molécules « réactives » à partir d'autres voies métaboliques (*elicitor*). On leur prête aussi depuis peu un rôle homéostatique clef lors des phases d'expansion des parois cellulaires (Abdulrazzak et al. 2006).

e. La matière organique

La lignine semble être au centre des problématiques de maintien de la fertilité des sols au travers des échanges entre les systèmes épigés et hypogés. L'usage de la totalité des fibres produites est une source de modification de ces échanges dans la mesure où il peut conduire à l'exportation sans restitution de la biomasse produite.

Les lignines, en association avec d'autres phénols végétaux comme les tannins, jouent un rôle important dans la pédogenèse et la fertilité. Elles constituent une réserve énergétique pour la microflore des systèmes hypogés (Tableau 15) et sont directement reliées au fonctionnement hydrique et minérale du sol.

¹ Liaisons condensées : -C-C-. Liaisons non condensées : -C-O-C-.

Tableau 15 : Pouvoirs calorifiques de quelques composantes de la lignocellulose (MJ/kg de MS)

Constituants	Klass	Carré
Monosaccharides (glucose..)	15,6	15,9
Disaccharides (saccharose..)	16,7	
Polysaccharides (cellulose..)	17,5	
Lignines	25,1	25,1

Les lignines sont les molécules les plus énergétiques de la biomasse lignocellulosique (Carré et al. 1991 ; Klass, 1998). Elles transfèrent au sol une partie de l'énergie stockée sous forme chimique par la photosynthèse.

La dépolymérisation des lignines, surtout par les basidiomycètes du sol, conduit à des groupes de dérivés phénoliques appartenant à la famille des humus¹ (Andreux, 1979 ; Garcia et al. 1987 ; Leisola et Waldner, 1988 ; Leisola et Garcia, 1989). Les produits de dégradation des lignines sont donc largement impliqués dans la structuration du sol et les échanges hydriques et minéraux au travers de la capacité d'échange (propriétés chélatrices des molécules dérivées).

Lemieux, (1995) pense que les grandes orientations de la pédogenèse sous peuplement végétal continu trouvent une explication dans le degré de polymérisation des lignines et leurs caractéristiques chimiques :

- Les lignines fortement polymérisées et difficilement dégradables² limitent le processus d'humification. Elles peuvent conduire à des accumulations végétales en l'absence d'oxygène (tourbes) ou des blocages de l'azote³. Les lignines peu polymérisées⁴ sont facilement dégradées et vont participer à la structuration du sol.
- Les lignines dissymétriques des conifères (un seul groupement méthoxyle) et de quelques autres espèces (dont l'eucalyptus) produisent des polyphénols inhibiteurs notamment des lipases qui éliminent la concurrence. Cette stratégie des peuplements conduit à des sols peu aptes à l'agriculture.
- Les lignines des peuplements de feuillus (deux groupements methoxyyles) favorisent par contre la biodiversité et donnent les meilleurs sols agricoles. Les lignines des graminées sont intermédiaires. Elles forment des agrégats sombres souvent instables à l'eau, typique des régions à faible pluviométrie où le manque d'eau favorise l'accumulation végétale (steppe, pampa...).

Il est intéressant de noter que la concentration en tannin condensés des feuilles de ligneux, explique 55 à 60 % des variations d'azote dans le sol (Schweitzer et al. 2004). Il existe donc un couplage étroit entre les composés phénoliques de la plante et l'azote du sol. Ces phénols jouent aussi un rôle important dans la décomposition des résidus végétaux ou dans la chélation des minéraux. Il est cependant difficile de faire la part des tannins et des lignines et de préciser le rôle respectif des principaux dérivés phénoliques du sol pour des problèmes analytiques. Nierop et Filley (2007) concluent à l'impossibilité de réaliser un profil des lignines dans le sol pour caractériser la dynamique de la matière organique. Les études d'Adani et al. (2007) montrent la contribution de la culture du maïs aux substances humiques, qui représentent 70 à 80 % du stock de carbone organique sol. Les résidus laissés au sol par le maïs sont la source de base des acides humiques retrouvés dans le sol, au travers d'acides hydroxycinnamiques partiellement hydrolysés et liés aux lignines et à des polysaccharides pariétaux.

¹ Appellations anciennes : acide fulvique (faible poids moléculaire) et acide humique (poids moléculaire important).

² Provenant surtout des tissus secondaires des ligneux.

³ Les protéines réagissent avec les tanins pour former des complexes stables (cf le tanage du cuir).

⁴ Provenant de tissus végétaux jeunes ou en croissance (feuilles, jeunes rameaux...).

La canne à sucre alimente le sol en lignines et phénols divers, par le métabolisme et le renouvellement continu du système racinaire. Un complément important de lignines est apporté par les feuilles et les talles sénescentes produites tout au long du cycle. [Yadav \(1990\)](#) montre que la paille de canne à sucre enrichit plus le sol en composés phénoliques que la paille de riz. Les composés identifiés par l'auteur sont nombreux (orcinol, pyrocatechol, acide p-hydroxybenzoïque, acide protocatechique, acide vanillique). Nous ne disposons pas d'informations spécifiques sur la dégradabilité des lignines des racines et des feuilles de canne à sucre.

L'étude des échanges de phénols entre la canne à sucre et le sol, en relation avec le maintien de la fertilité et avec les modalités de gestion de la biomasse résiduelle sont des axes de recherche prometteurs.

44. Modulation de la biosynthèse des lignines

441. Point des connaissances

Les lignines présentent un potentiel économique considérable comme substitut aux usages des phénols du pétrole mais aussi dans le cadre d'usages liés à leur spécificité chimique. Les lignines constituent cependant une contrainte pour les principales utilisations actuelles de la biomasse :

- Elles diminuent le rendement énergétique des fourrages des ruminants qui ne la digère pas ;
- Elles doivent être éliminées des fibres cellulosiques pour la plupart des usages « textiles » ;
- Elles ont un poids éco-environnemental très important dans le cas de la production de pâte à papier¹ ;
- Elles constituent une limite au développement des carburants cellulosiques.

Nous abordons la problématique de digestibilité animale du fait de la pression de recherche importante sur le maïs, Poacée en C4. Les recherches donnent des informations sur les liaisons à rompre pour extraire les lignines. Les processus biologiques de digestibilité peuvent être comparés, mais avec précaution, aux processus thermochimiques d'extraction des fibres cellulosiques. Les moyens diffèrent, mais l'objectif est identique : l'extraction des lignines. On peut faire l'hypothèse qu'une délignification difficile par voie biologique le sera aussi par voie thermochimique.

La plupart des études conduites sur le maïs et les fourrages portent sur les mutants à nervure brune (*brown-midrib* ou *mb*). Les mutations *mb*# provoquent une diminution de teneur en lignine et modifient les teneurs en acides hydroxycinnamiques. Elles sont présentes chez la plupart des Poacées diploïdes en C4 dont elles améliorent la digestibilité des parois cellulaires ([Barrière et al. 2004](#)).

Cette mutation que l'on retrouve chez le sorgho n'affecte apparemment pas la canne à sucre, espèce hautement polyploïde et aneuploïde.

La digestibilité des pailles par les microorganismes du rumen des herbivores est faible. Elle représente entre 33 % pour le blé et 80 % pour les feuilles de ray-grass, du contenu énergétique ([Ralph et al. 2004](#)). Elle varie de 35 à 60 % pour les hybrides de maïs précoces ([Barrière et al. 2003](#)). Elle est de 70 % pour l'ensilage de tiges de maïs.

¹ Le procédé Kraft élimine 250 kg de lignine par tonne de bois en utilisant plus de 250 kg de soude et des additifs soufrés. L'ensemble est porté à une température de 170° C pendant plusieurs heures.

Fontaine (2002) montre que les QTLs¹ de digestibilité des pailles de maïs sont colocalisés avec les QTLs de teneur en lignine et en acides phénoliques. Des études, dont celles de Feirrer et al. (2005), et de Barrière et al. (2005) montrent que cette digestibilité de la matière sèche des parois cellulaires est corrélée négativement avec la teneur en lignines, mais aussi avec celle en acide férulique et en acide *p*-coumarique. Plus récemment, Riboulet et al. (2008) mettent en évidence une corrélation négative entre la digestibilité des parois cellulaires de maïs et les teneurs :

- En unités monomériques H et S ;
- En acide férulique estérifié ; et
- En *p*-coumarates.

La corrélation est par contre positive avec l'acide diférulique². Les auteurs ne sont cependant pas certains que les conditions d'extraction respectent les proportions entre l'acide férulique et son dimère. Les acides féruliques et *p*-coumariques apparaissent comme de bons indicateurs de digestibilité. Des résultats comparables sont signalés pour l'orge avec une variabilité significative des teneurs en acides hydroxycinnamiques entre géotypes (LiQin et al. 2009).

Harada et al. (2001) montrent qu'un traitement à la soude à 4 %, augmente considérablement la digestibilité de la paille de riz. La soude, en détruisant les liens ester des acides féruliques et *p*-coumarique, libère les lignines et les hémicelluloses et accroît l'accessibilité de la partie digestible de la lignocellulose. La teneur en hémicellulose est également corrélée positivement à la digestibilité.

Ces études mettent en évidence la grande variabilité des paramètres de digestibilité, exploitable par la génétique, soit au profit de l'élevage, soit à celui de tout autre usage de la lignocellulose (biocarburants, pâte...).

Le rapport S/G des lignine est lié positivement à la digestibilité des parois cellulaires des Poacées (Jung et Vogel, 1992) ainsi qu'à l'aptitude papetière des lignocelluloses (Chang et Sarkame, 1973) et du bois de peuplier (Ralph et al. 2004). L'augmentation de proportion de S améliore de manière importante la fabrication de papier par le procédé Kraft sans effet agronomique dépressif. L'enrichissement en lignine G est par contre défavorable à la production papetière (Mouille et al. 2006).

Dans le domaine des biocarburants, Anderson et Akin (2008) soulignent les limitations apportées par les composés phénoliques à la bioconversion des carbohydrates des Poacées. En dehors des lignines, la contrainte majeure à la valorisation des tissus non lignifiés est la présence de liens esters entre les hémicelluloses et les acides féruliques et *p*-coumariques.

Un objectif majeur des recherches sur les plantes fourragères porte donc sur l'amélioration de la valeur alimentaire, au travers d'une diminution des teneurs en lignines des parois cellulaires, mais aussi au travers d'actions sur les nombreux liens qui unissent les lignines aux hémicelluloses. Le principal challenge de ces recherches est d'atteindre les objectifs fixés sans préjudice majeur sur le comportement agronomique de la culture.

442. Lignines et qualités agronomiques

La recherche française longtemps focalisée sur l'amélioration du rendement en grain du maïs a conduit à une diminution moyenne de 5 % de la digestibilité par rapport aux anciennes variétés (Barrière et al. 2005). Ce travail a cependant permis d'améliorer de

¹ Quantitative Trait Loci ou locus de caractères quantitatifs.

² Dimère de l'acide férulique qui forme des ponts notamment entre groupes d'hémicellulose. Certains auteurs mentionnent l'existence de trimères. Aucune mention n'est faite de dimère de l'acide *p*-coumarique.

manière remarquable le comportement agronomique de la culture (rendement, résistance aux maladies, à la verse...). Il n'y a cependant pas aujourd'hui de preuves formelles que la digestibilité de la paille de maïs soit corrélée à des caractéristiques agronomiques peu souhaitables. La même remarque peut être faite pour d'autres fourrages. Toutefois, [Anterola et Lewis \(2002\)](#) remarquent qu'une diminution de la synthèse des monolignols sur tabac, *Arabidopsis*, tremble (*aspen*), peuplier (*poplar*) et luzerne (*alfalfa*) affecte l'intégrité et la fonction vasculaire « *et peut être même dans certains cas la croissance et le développement (SIC)* ». De même, [Ralph et al. \(2004\)](#) rappellent que sur 22 localisations de QTL impliqués dans la lignification des parois cellulaires et leurs digestibilités, 14 sont également impliquées dans la tolérance à la pyrale du maïs¹ (*european corn-borer*).

De nombreuses enzymes figurent parmi les candidats génétiques intéressants pour réguler la synthèse des lignines ([Anterola et Lewis, 2002](#) ; [Hoffmann, 2003](#) ; [Ralph et al. 2004](#)).

Deux projets de recherche européens ont été développés pour améliorer l'extractibilité et la digestibilité de la lignine². Les cultures visées étaient des ligneux (peuplier, eucalyptus, sapin) et des fourrages (luzerne, fétuque). Le tabac, à partir duquel de nombreuses modifications d'enzymes intervenant dans la synthèse des lignines ont été développées, a servi de modèle à ces projets.

Le génie génétique permet de modifier la quantité et la qualité des lignines synthétisées en modifiant une étape du métabolisme des phénylpropanoïdes ([Baucher, 1998](#); [Anterola et Lewis, 2002](#)). [Henkes et al. \(2001\)](#) ont modifié l'activité d'une transketolase du tabac (TK). Cette enzyme du métabolisme primaire intervient dans le cycle de Calvin pour produire un précurseur de la voie du shikimate³. La TK agit ainsi sur le métabolisme secondaire des phénylpropanoïdes dont les lignines sont issues. Les variations d'activité de la TK modifient chez le tabac l'activité photosynthétique (saturation en CO₂ et en lumière), la production de sucre, la production de phénols dont : les acides aromatiques solubles⁴, le tocophérol (précurseur de la vitamine E) et les acides hydroxycinnamiques, précurseurs des monolignols des lignines.

Une diminution excessive des lignines, conduit par contre à des caractéristiques non souhaitables des plantes comme le nanisme. Chez *Arabidopsis*, [Berrio-Sierra \(2007\)](#) constate que des gènes mutants qui interviennent dans la biosynthèse des lignines conduisent à une réduction de 30 à 40 % des lignines et un effondrement de la fréquence des unités non condensées. Les conséquences morphologiques sont nombreuses avec notamment des assemblages anormaux des parois cellulaires, une désorganisation et un relâchement des microfibrilles de cellulose, et des propriétés mécaniques dégradées. Des problèmes de nanismes, de collapsus vasculaires, de désorganisation des tissus et de diminution de la résistance aux pathogènes sont signalés par d'autres auteurs ([Jouanin, 2004](#) ; [Weng et al. 2008](#)). Ces résultats tendent tous à prédire, sans le démontrer de manière formelle, que les manipulations génétiques pour diminuer la biosynthèse des lignines affectent les qualités agronomiques de la plante.

Le CIRAD a travaillé sur l'identification des gènes régulant la synthèse des lignines sur *Eucalyptus* ([Gion, 2000](#)). L'eucalyptus présente une forte héritabilité pour la teneur en lignines et pour la vitesse de décomposition des lignines ([Poke et al. 2006](#)). L'INRA a travaillé sur le métabolisme secondaire des phénylpropanoïdes du peuplier ([Pilat, 2009](#)). Les cibles

¹ *Ostrinia nubilalis*.

²Projet OPLIGE (**OP**timization of **L**ignin in crops and **I**ndustrial plants through **Ge**netic **En**gineering) et projet TIMBER (**T**ree **IM**provement **B**ased on genetic **En**gineer**IN**g).

³ érythrose-4-phosphate

⁴Essentiellement dans le cas du tabac, les acides caféiques et chlorogéniques (ester quinique du précédent)

étaient deux enzymes intervenant dans la synthèse de précurseur des lignines : la cinnamoyl CoA réductase et la caffeoyl CoA O-méthyl transférase dont le site actif a été décrit sur tabac (Hoffmann *et al.* 2001; 2003). Des peuplements transgéniques de peupliers sont en cours d'évaluation au champ.

Le génie génétique s'avère très performant pour réguler la production des lignines ou accroître leurs sensibilités à la dégradation. La difficulté de l'exercice consiste à trouver un juste milieu entre la teneur recherchée et la durabilité de la production.

L'étude de la régulation de la biosynthèse des gibbérellines¹ sur de nombreuses plantes, monocotylédones et dicotylédones, montre que le taux de gibbérelline est corrélé positivement avec l'accumulation de biomasse, la formation de lignine et le rendement photosynthétique. Un lien positif semble lier la teneur en lignine à la production de biomasse.

L'action des gibbérellines est attribuable à l'accroissement de la formation de lignine et l'allongement des fibres du xylème. Les tiges sont plus longues, les entrenœuds plus nombreux et le rendement photosynthétique accru.

L'application externe de gibbérelline a fait l'objet de nombreux essais pour accroître la production de la canne à sucre. Les auteurs (Alexander, 1973 ; Moore et Buren, 1978 ; Moore et Ginoza, 1979) mettent en évidence des différences de résultats attribuables à de nombreux facteurs : la variété, le stade de développement, la fréquence des applications, le climat... Les résultats sont globalement négatifs car la technique ne permet pas d'apporter la molécule sur le bon site, à la bonne dilution et au bon moment.

Les approches transgéniques pour accroître le métabolisme des gibbérellines² sont par contre très encourageantes. Eriksson *et al.* (2000), montrent sur tremble transgénique (*hybrid aspen*) que l'augmentation de synthèse des gibbérellines se traduit pas une augmentation de la lignine, de la longueur des fibres du xylème et du rendement photosynthétique. Biemelt *et al.* (2004) travaillant sur un tabac transgénique modifié pour l'expression des gibbérellines³ montrent qu'un accroissement de la synthèse des lignines, outre un accroissement de l'activité photosynthétique augmente la proportion d'écorce des tiges au détriment de la moelle. Le nombre de vaisseaux du xylème s'accroît tandis que le nombre de cellule du parenchyme central diminue.

Les essais sur canne à sucre sont récents. Pribil *et al.* (2007) ont modifié le métabolisme des gibbérellines d'une variété australienne de canne à sucre (Q117) en surexprimant deux enzymes régulant la biosynthèse des gibbérellines. Ils obtiennent un accroissement de la production de biomasse avec des tiges plus longues et un nombre plus important d'entrenœuds. Des tests au champ sont envisagés.

Les lignines sont inhibitrices des processus de saccharification sur lesquels reposent l'avenir des biocarburants de seconde génération. Cellulose et hémicelluloses sont noyés dans la lignine, ce qui les rend peu accessible. Les lignines ont de plus des capacités d'absorption des enzymes hydrolytiques (Weng *et al.* 2008). Par ailleurs, les procédés de délignification qui permettent de rendre les composantes glucidiques accessibles à l'hydrolyse enzymatique, génèrent des composantes inhibitrices des enzymes intervenant dans la saccharification et la fermentation alcoolique. La délignification de la lignocellulose est ainsi un élément clef du développement de la production d'éthanol de seconde génération (Hamelinck *et al.* 2005 ; Weng *et al.* 2008).

¹ Hormones végétales contrôlant la croissance et le développement des plantes supérieures. Elles interviennent dans la floraison et la médiation de signaux environnementaux comme la longueur du jour.

² Les gibbérellines regroupent une centaine de diterpènes tetracycliques issus du métabolisme des diterpénoïdes. Les terpènes (10C) sont des hydrocarbures végétaux. Les diterpènes ont 20 atomes de carbone.

³ Gènes provenant d'*Arabidopsis* (Brassicaceae).

45. Le dosage des lignines

La structure 3D des molécules de lignine n'est pas connue ou est mal connue dans la mesure où elle est très variable. Le dosage chimique implique une extraction et une dépolymérisation qui conduit à un mélange chimique complexe de chaînons partiels du polymère dont on dose une partie. On rencontre de plus en plus dans la littérature scientifique récente une caractérisation des lignines par une formule à 9 atomes de carbone (unités de phénylpropane) avec mention des groupes fonctionnels $C_9H_mO_n(OCH_3)_o(OH_{phenol})_p$. Ces formules « relatives » sont notamment obtenues à partir de spectre FTIR¹.

Il existe de nombreuses méthodes chimiques pour analyser les lignines. Elles donnent toutes des mesures statistiquement différentes pour un même échantillon ([Hatfield et Fukushima, 2005](#)). La plus connue de ces méthodes, l'ADL², produit systématiquement les valeurs les plus faibles. Les méthodes ADF³ et au permanganate donnent les valeurs les plus élevées. La méthode Klason très utilisée, présente l'intérêt d'être adaptable pour analyser l'ensemble des composantes des parois cellulaires en une fois.

Le choix de la méthode va dépendre essentiellement du laboratoire, car toutes ces méthodes sont complexes à mettre en œuvre, lentes et invasives. La règle essentielle à respecter est qu'une seule et même méthode soit employée pour tous les échantillons. Ces conclusions s'appliquent au calage des analyses par SPIR⁴ que nous envisageons d'utiliser dans nos projets.

5. Synthèse et agencement chimique

51. La paroi cellulaire

Le carbone fixé par la photosynthèse se retrouve majoritairement dans la paroi cellulaire sous forme de polymères lignocellulosiques. Les parois cellulaires végétales constituent ainsi la source de carbone renouvelable la plus abondante de la biomasse terrestre. La connaissance des parois cellulaires est donc incontournable dès lors que l'on aborde la production renouvelable de fibres mais aussi d'énergie ou de synthons pour la chimie verte. Notons que les parois cellulaires contiennent aussi de très nombreuses protéines qui ont des fonctions structurales et interviennent dans les processus de maintenance des parois.

Les parois cellulaires sont au nombre de trois (*Figure 10*) avec de l'extérieur de la cellule vers son centre :

- La lamelle moyenne communes aux cellules ;
- La paroi primaire ; et
- Les trois couches S1, S2 et S3⁵ de la paroi secondaire, respectivement externe, médiane et interne.

La paroi secondaire est essentielle aux propos de cette étude. Son organisation très structurée, est à l'origine des propriétés mécaniques des fibres ([Roland, 1980](#)). La différenciation des parois provient de l'organisation des fibres cellulosiques. L'orientation des

¹ Fourier Transform Infrared Spectroscopy.

² Acid Detergent Lignin.

³ Acid Detergent Fiber.

⁴ Analyse spectrale dans le proche infra rouge.

⁵ La couche S3, la plus interne, n'est pas toujours présente.

fibres cellulosiques de la paroi primaire est aléatoire. Les fibres cellulosiques de la paroi secondaire sont constituées des microfibrilles les plus épaisses. Elles sont organisées parallèlement les unes aux autres, avec une orientation spécifique à chacune des deux ou trois couches. L'ensemble ainsi structuré renforce la rigidité de la paroi dont l'organisation s'apparente à celle d'un contre plaqué (*plywood*).

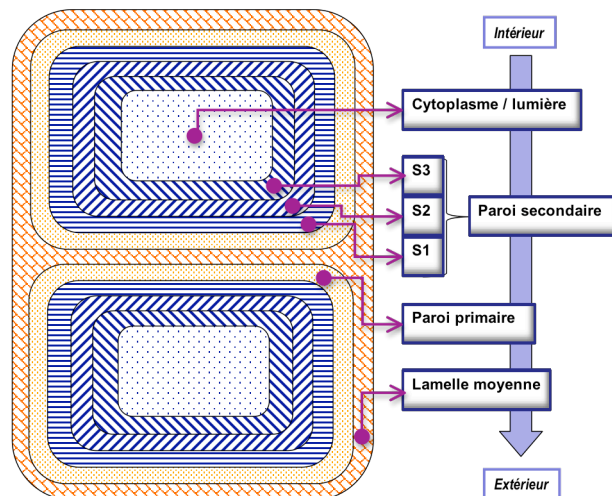


Figure 10 : Organisation des parois cellulaires

52. Les Sites de synthèse de la lignocellulose.

Les trois polymères végétaux composant la lignocellulose sont synthétisés sur des sites cellulaires différents et à des périodes différentes de la vie de la cellule (Catesson, 1980 ; Buchaman et al. 2001).

Les hydrates de carbone sont synthétisés à l'intérieur de la cellule :

- Les hémicelluloses sont synthétisées au niveau de l'appareil de Golgi qui produit aussi les pectines ;
- La cellulose est synthétisée sous forme de microfibrilles au niveau de la membrane plasmique de la cellule.

La synthèse des lignines dans la cellule est plus mal connue que celle des hydrates de carbone. Les monolignols sont des composés instables et toxiques pour la cellule. Leur détoxification serait assuré par un stockage sous forme de glucoside dans la vacuole. Ils seraient ensuite transportés de la solution cytoplasmique (*cytosol*) vers l'extérieur sur les sites d'élaboration des parois (*apoplast*). Les monolignols sont alors libérés par une glucosidase. Ils sont ensuite pris en charge par des phénol-oxydases extracellulaires synthétisées dans le cytoplasme. Deux classes distinctes d'enzymes, les peroxydases et les laccases qui utilisent respectivement le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et l'oxygène moléculaire (O_2), sont responsables de cette polymérisation oxydative.

Les liaisons entre unités sont d'abord faibles pour se renforcer progressivement par des liens condensés (C-C, éther) qui les rend beaucoup plus difficile à dégrader. Monties (2005) indique la réversibilité de ces mécanismes au niveau de la paroi primaire, mais leur caractère peu réversible après des phénomènes de réticulation dans le cas de la paroi secondaire.

La nature des monolignols couplés varie selon les tissus. Les unités H et G sont surtout présentes en début de lignification des tissus. Elles seront donc surtout présentes dans la lamelle moyenne. Les unités S qui sont en fin de chaîne de synthèse des monolignols (acide

sinapique) apparaissent en fin de lignification des tissus. On les retrouvera donc surtout dans les parois secondaires. [Berrio-Serra \(2007\)](#) suggère, à partir d'étude de mutation sur *Arabidopsis*, que l'assemblage tissu spécifique des monolignols sur les parois est soumis à une régulation spacio-temporelle. Nous n'avons pas trouvé dans la bibliographie consultée, de données relatives aux mécanismes expliquant les différentiels de lignification entre les tissus.

De nombreuses études montrent que dans le cas particulier des graminées, l'acide férulique et l'acide *p*-coumarique jouent des rôles essentiels dans le processus de lignification et de réticulation des parois. [He et Terashima \(1990\)](#) montrent pour la canne à sucre, des dépôts importants d'acide férulique dans les tissus les plus jeunes, en tout début de lignification. Les auteurs signalent un taux élevé d'acides phénoliques dans le parenchyme qui fausse le dosage des lignines dans ce tissu en établissant des liaisons chimiques. La présence de nombreux liens ester explique selon les auteurs la facilité particulière de délignification des lignines de canne à sucre par voie alcaline.

[Jung et Deetz \(1993\)](#) émettent l'hypothèse d'une intervention précoce de l'acide férulique qui estérifié à l'arabinoxylane (hémicellulose) permet l'accrochage initial des monolignols à la paroi primaire. Les dépôts d'acides *p*-coumarique et sinapique interviennent ensuite et s'accroissent au fur et à mesure de la lignification. L'acide *p*-coumarique établit les mêmes liens chimiques que l'acide férulique, mais il n'interviendrait pas dans la phase initiale de dépôt des premiers monolignols. [Morrison et al. \(1998\)](#) confirment cette hypothèse, et indiquent que l'acide *p*-coumarique interviendrait lors de la synthèse des parois secondaires en majorité pour fixer les monolignols S.

Contrairement à l'acide *p*-coumarique, seul l'acide férulique établit des liaisons éther ester entre les fragments de lignines ([Lam et Liyama, 2000](#)). Ces liaisons renforcent les parois et établissent une barrière à la pénétration des pathogènes et à leur diffusion. [Feng et al. \(2005\)](#) trouvent que 44 à 55 % de l'acide férulique de la bagasse de canne à sucre est estérifiée avec les hémicelluloses et que l'autre moitié est estérifié avec l'oxygène phénolique des lignines composant les parois cellulaires.

Les arabinoxylanes sont reliés aux acides féruliques dans la cellule et exporté sous cette forme vers les parois en formation.

La dégradabilité des lignines est liée à la teneur en lignine à la structuration et réticulation du réseau de lignine et l'importance de la réticulation par l'acide férulique ou ses dimères ([Graber et al. 2004](#)).

Le biocomposite lignocellulosique pariétal est constitué par un assemblage de fibres celluloses avec les matrices d'hémicellulose de lignine et de l'eau. Il se développerait à l'état de gel colloïdal par des interactions à caractère hydrophobes¹, à partir des liaisons ioniques et hydrogène, notamment entre les hémicellulose et cellulose.

53. Chronologie de la synthèse des parois

La synthèse des parois évolue avec la vie de la cellule. Les hydrates de carbone sont les premiers synthétisés. Les lignines se forment très peu en début de vie de la cellule et en grande quantité en fin de vie, avec des intensités très variables selon le type de tissu. Il existe une alternance de dépôts successifs d'hydrates de carbone suivi de lignines au niveau des différentes couches de la paroi secondaire.

La lamelle moyenne et la paroi primaire, qui constituent les couches les plus externes de la cellule, sont synthétisées en premier. La paroi secondaire est la dernière à être synthétisée.

¹ Le caractère hydrophobe est directement lié à l'enrichissement en composés phénoliques.

Elle apparaît lorsque la cellule a achevé sa croissance. La constitution de la paroi secondaire s'achève par la synthèse de la couche S3 qui est la plus interne.

531. La lamelle moyenne

Cette paroi est aussi dénommée lamelle mitoyenne. Elle constitue la partie commune entre les cellules. Il s'agit donc du « ciment » des tissus. Elle est principalement composée de pectines hydrophiles polyanioniques et de protéines. Les pectines sont à l'origine des propriétés chimiques et mécaniques de la paroi (hydratation, porosité, plasticité, charge...). La lamelle moyenne est imprégnée de lignine en fin de vie des cellules, surtout lorsqu'elle est localisée dans des tissus conducteurs et de soutien. Elle est alors à l'origine des regroupements des fibres en faisceaux plus ou moins importants lors des extractions mécaniques.

La séparation des fibres lors de leur extraction implique donc en premier lieu la délignification de la lamelle moyenne.

Dans les tissus de stockage et de conduction de la sève élaborée, qui ne sont pratiquement pas lignifiés, la lamelle moyenne accroît la masse de « non fibre » qu'il faudra séparer des fibres avant de procéder à la délignification.

532. La paroi primaire

La paroi primaire commence à se former en début de vie de la cellule. Elle se met progressivement en place pendant la phase de croissance. Elle est constituée d'une matrice d'hémicellulose et de pectines, en association avec de nombreuses protéines et des composés phénoliques, combinées avec des microfibrilles de cellulose dont l'agencement est peu ordonné.

La paroi primaire est très hydratée (90 % d'eau). Elle protège la membrane plasmique en conférant une extensibilité qui autorise la croissance et contient la pression de turgescence. Pendant cette phase de croissance, les dépôts de lignines sont très faibles. Le processus de lignification intervient surtout à partir de la formation de la paroi secondaire.

Avec environ un dixième de micromètre, la paroi primaire est très peu épaisse et sa différenciation avec la lamelle moyenne n'est pas évidente. Certains auteurs regroupent ainsi les deux parois en une lamelle moyenne composite.

533. La paroi secondaire

La paroi secondaire commence à se former lorsque la croissance cellulaire est achevée. Sa fabrication par la cellule met en jeu la constitution d'une matrice très compacte d'hémicellulose autour de fibres de cellulose très cristalline. La cellulose des parois secondaires est généralement plus cristallisée que celle des parois primaires. Les microfibrilles de cellulose, très compactes sont orientées par rapport à l'axe de la cellule dans des directions qui varient d'une strate à la suivante formant une trame qui accroît la solidité mécanique. Cet ensemble très peu hydraté (20 % ou moins) s'imprègne ensuite de lignine. La paroi secondaire est beaucoup plus épaisse que la paroi primaire. Elle représente environ 60 % du volume de la paroi cellulaire. Elle confère à la cellule la résistance mécanique et une barrière aux transferts hydriques.

Les parois secondaires qui nous intéressent dans le cadre d'une production de fibre sont celles des tissus conducteurs. L'observation microscopique montre qu'elles sont caractérisées par trois couches qui se distinguent les unes des autres par l'orientation des microfibrilles de cellulose. L'organisation des couches de la paroi secondaire est précise et spécifique aux

espèces. Elle explique les propriétés mécaniques des fibres, notamment du bois. Le modèle général de description de ces couches est le suivant :

- La couche S1, la première formée (la plus externe) est une à trois fois plus épaisse que la paroi primaire. Les microfibrilles qui la constituent sont pratiquement perpendiculaires à l'axe longitudinale de la cellule (60 à 80°) ;
- La couche S2 de la paroi secondaire est la plus épaisse (1 à 10 µm). Elle est constituée de microfibrilles de cellulose orientées presque perpendiculairement à celle de S1 (5 à 30° par rapport à l'axe longitudinal). Elle est renforcée par des couches concentriques de lignine.
- La couche S3, la dernière formée mais qui n'est pas toujours présente, à une faible épaisseur, comparable à celle de la paroi primaire. Les microfibrilles de cellulose sont orientées entre 60 et 90° de l'axe de la cellule.

Les dépôts successifs de lignine sont précédés des dépôts de cellulose et hémicellulose. Le dépôt de plus important de lignine correspond à la dernière couche (S3). La lignine se dépose de manière séquentielle, chronologiquement hétérogène, avec des variations des trois monolignols (H, G et S). Les qualités mécaniques de la paroi peuvent varier par des orientations préférentielles des noyaux phénols imposées par la couche réceptrice de polysaccharide.

La quantité de lignine synthétisée est dépendante de nombreux facteurs déjà évoqués. Rappelons seulement que des synthèses de lignine *de novo* peuvent intervenir pour produire des barrières mécaniques en réponse à des stress subits par la plante (Vance et al. 1980).

La mise en évidence de plusieurs types de lignines provient d'expériences sur la délignification. La délignification est plus rapide sur les parois secondaires et les coins des cellules que sur les parois primaires. Selon Monties, (1980), cette hétérogénéité est liée à la fréquence des monomères, à leurs modes de liaison dans les multiréseaux et aux liaisons de ces réseaux avec d'autres molécules.

Tableau 16 : Répartition de la lignine dans les principaux tissus de la canne à sucre

Tissu	% Lignine
Parenchyme	13
Faisceaux vasculaires	19
Epiderme et sclérenchyme	22

*Analyse par procédure acétyle bromide – UV

He et Terashima (1990) comparant des entrenoeuds de tiges de 6 mois du cultivar Ryukyu 78-16 montrent que la composition des lignines de canne à sucre varie en fonction du stade de lignification et de la nature des tissus (Tableau 16). Dans les parois secondaires, la fréquence des monolignols est S>G>H. Il y a cependant plus d'unités G et H que S dans la lignine des vaisseaux du xylème. La facilité¹ de dégradations des lignines de canne à sucre comme celle des graminées lors des procédés industriels de délignification² est attribuée par les auteurs aux liaisons croisées qui mettent en jeu des esters d'acides phénoliques.

54. Organisation des polymères pariétaux

Il existe plusieurs modèles décrivant l'agencement structural de ces molécules dans les parois cellulaires. Le modèle de Goring (1977) pour les espèces ligneuses (bois pour l'industrie papetière) alterne en quinconce des couches constituées de cellulose entourées

¹ Qualificatif relatif aux autres espèces ligneuses.

² Fabrication de pulpe par traitement à la soude (soda pulping).

d'hémicellulose séparées par des espaces comblés par de la lignine (**Figure 11**). Ce modèle a été élaboré pour expliquer la libération des fibres de cellulose par dissolution des lignines lors de la fabrication de pâte.

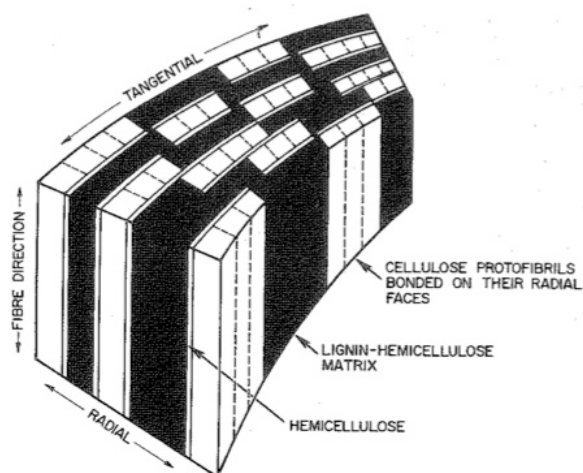


Figure 11 : Structure d'après [Goring, 1977](#)

Selon une étude bibliographique de [Ramos \(2003\)](#), les chaînes linéaires élémentaires de cellulose sont liées chimiquement en grands nombres pour former des fibrilles. Ces fibrilles sont associées pour former des éléments cristallins insolubles. Ces derniers sont regroupés par quatre en faisceaux agrégés par une monocouche d'hémicellulose. Cet ensemble entouré d'une couche d'hémicellulose recouverte de lignine constitue l'élément architectural unitaire, la microfibrille (**Figure 12**).

Dans le cas particulier des Poacées, les acides hydroxycinnamiques assurent par des liaisons ester le raccordement chimique entre les lignines et les hémicelluloses ([Scalbert, 1984](#)). Les esters féruliques réticulent les chaînes d'hémicellulose en formant des dimères diféruliques qui constitueraient des sites de croissance pour les lignines. Certains auteurs évoquent la présence de trimères féruliques. L'acide paracinnamique ne formerait pas de tels dimères ([Jacquet, 1997](#)).

Dans le cas particulier de la canne à sucre, ces microfibrilles sont constituées d'une alternance de parties cristallines séparées et de parties amorphes alignées dans l'axe de la fibre. Leur pas est de 60 à 100 nm ([Battacharya et al. 2008](#)). Il est cohérent avec le degré de polymérisation optimum des structures cristallines de cellulose (LODP) qui se situe entre 150 et 200 molécules de glucose dont chacune occupe un espace de 0,5 nm dans l'axe de la fibre (soit 75 à 100 nm).

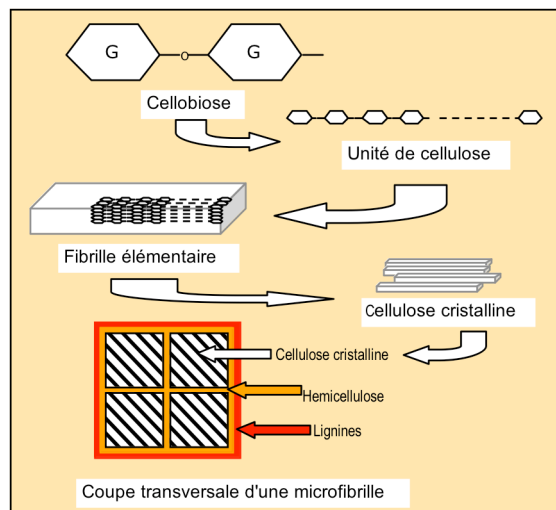


Figure 12 : Structure d'une microfibrille

Cette intrication où la cellulose est noyée dans un réseau d'hémicellulose recouvert de lignines explique la grande stabilité de la lignocellulose et sa résistance aux agresseurs externes. Elle explique aussi pourquoi l'extraction de la cellulose de la gangue dans laquelle elle est incrustée est une opération complexe qui fait appel à des méthodes souvent dispendieuses en énergie et en produits chimiques polluants. Notons cependant que le rapport cellulose/lignines de la bagasse de canne à sucre démoellée est favorable à la fabrication de pâte par voie alcaline avec une charge chimique légère et un bon rendement en pâte (Khristova *et al.* 2006).

Ces deux modèles soulignent le problème clef de fabrication d'éthanol de seconde génération : la faible accessibilité enzymatique de la cellulose native. Les hémicelluloses sont facilement hydrolysables. La lignine assure une protection efficace de la cellulose qui est ainsi peu accessible. La structure cristalline de la cellulose représente de plus un obstacle à l'hydrolyse.

6. Quelques pistes de recherche

Le lien positif étroit entre la production de biomasse, le rendement photosynthétique et la biosynthèse des lignines permet d'envisager la mise au point de nouveaux indicateurs de sélection, notamment pour des cannes destinées à la production de biomasse ou de fibre. Les mesures de rendement sont lourdes pour des plantes à multiplication végétative comme la canne à sucre. Les surfaces expérimentales sont importantes. Les moyens à mettre en œuvre pour récolter broyer déshydrater et analyser sont en proportion. Il est donc intéressant d'estimer l'intérêt de remplacer de telles mesures par des évaluations simplifiées de teneur en lignines et de composés phénoliques ou benzoïques ciblés.

Par ailleurs, les actions sur le métabolisme des gibbérellines par génie génétique présentent un intérêt considérable dans le domaine des énergies renouvelables basées sur la combustion (valeur énergétique) et dans celui de la fabrication de biomatériaux entièrement renouvelables (résine naturelle et remplissage). Le génie génétique est particulièrement bien adapté, en matière de risque, à des plantes dont le mode de multiplication est végétatif.

Le rôle des lignines et des acides hydroxycinnamiques dans le comportement agronomique des Poacées et dans les qualités des fibres produites renforce l'intérêt de leur étude.

Il est possible de moduler la production de lignine au travers de l'agronomie, notamment

par le choix variétal et le calage du cycle de culture. L'état de maturation de la plante, contrôlable par les deux techniques agronomiques évoquées, est de fait un facteur déterminant de la qualité des fibres qui seront produites.

La partition de la récolte peut aussi présenter un intérêt à étudier : les fouets sont très riches en fibre et devraient, comme tissu jeune, être pauvres en lignines. Les feuilles, par leur morphologie pourraient constituer une source de fibre avec des particularités spécifiques (longueur, hydratation...).

Plus globalement, la connaissance des mécanismes de synthèse des lignines et des acides phénoliques au cours du développement et de la maturation du couvert devrait permettre une meilleure compréhension des caractéristiques agronomiques de la culture et la qualité technologique des fibres produites.

Les principaux sujets de recherche agronomique qui se dessinent au travers des connaissances bibliographiques évoquées portent sur la nécessité de mieux connaître :

- L'évolution de la teneur dans les principaux polymères pariétaux composant la fibre.
- La compréhension des mécanismes de cette évolution au travers des liens avec les conditions climatiques ;
- L'évolution comparée des bilans pondéraux des principales composantes de la biomasse (fibre, sucre et eau) pour les cultivars du groupe *Saccharum* choisis dans une large gamme de spécificités agronomiques à produire plutôt du sucre (variétés sucrières) ou plutôt de la fibre (variétés mixtes) ou uniquement de la fibre (cultivars sauvages de type *Erianthus* ou *S. spontaneum* *S. robustum* ou *Miscanthus*).

Des études récentes, qui portent sur la partition de la matière sèche de différents cultivars et hybrides de *Saccharum* *Mischantus* et *Panicum virgatum*, mettent en évidence une importante variabilité (Burner et al. 2009).

Il est envisageable de concevoir des modèles prédictifs utiles à la compréhension des mécanismes de synthèse de la fibre ainsi qu'à l'agronomie. De tels études devrait nous conduire à des collaborations avec l'INRA (*Miscanthus*, lignines, acides phénoliques, digestibilité, génétique de précision...) et l'Université de Haute Alsace (fibres textiles).

IV. LES OPERATIONS POST-RECOLTE

1. Introduction

Le terme de bagasse de ce chapitre regroupe pour simplifier toute la production lignocellulosique de la culture, qu'il s'agisse de bagasse ou de biomasse résiduelle. Le passage du produit brut au produit fini passe par trois étapes principales liées à la nature de la ressource :

- La bagasse est un produit brut et saisonnier dont la production se limite à la saison sucrière. Son utilisation industrielle implique donc un stockage.
- La bagasse est un mélange hétérogène de tissus végétaux dans lequel se trouvent les fibres. L'utilisation de la fibre implique donc une opération de défibrage pour extraire la fibre de la bagasse.
- Les fibres extraites sont formées de polymères qui forment des structures réticulées très stables, renforcée par des liaisons covalentes. L'intérêt textile porte sur un seul de ces polymères qui est la cellulose. Cette hétérogénéité de la bagasse implique des procédés d'extraction pour extraire la cellulose de sa gangue de lignine et d'hémicellulose.

Les étapes de préparation de la fibre textile de canne à sucre font référence aux usages de destination. Les modalités d'extraction vont en effet orienter la qualité de la fibre. Nous nous sommes limités aux principaux usages qui ont cours aujourd'hui : le papier et les panneaux de particule.

Les modalités de stockage vont conditionner le niveau de dégradation de la fibre brute. Les modalités d'extraction des fibres cellulosiques vont conditionner leurs caractéristiques mécaniques (densité, état de surface, stabilité aux contraintes hydriques et thermiques) ainsi que leurs stabilité chimique et biologique. Ces caractéristiques définissent la qualité des fibres et leur usage potentiel.

La filière post récolte de stockage et d'extraction, que nous abordons dans ce chapitre, est donc une phase importante des procédés industriels textiles.

2. Caractérisation de la ressource

La production de bagasse dépend de la production saisonnière de sucre. L'usage textile de la culture met en jeu des investissements industriels dont l'amortissement est difficilement réalisable sur la base d'un fonctionnement saisonnier. Il est ainsi quasi nécessaire d'envisager un stockage longue durée de la fibre de bagasse, pour alimenter une filière textile en continue.

21. La fibre brute

211. Les facteurs de qualité

La production de bagasse ne repose pas aujourd'hui sur des critères de qualité de la fibre. Le seul critère important, qui se rapporte à la bagasse et non à la fibre est l'humidité. Elle conditionne en effet le rendement thermique lors de la combustion.

La qualité observée de la fibre de bagasse est dépendante de nombreux paramètres dont :

- Les modalités de récolte avec d'importantes variations selon que la récolte est manuelle ou mécanique ; que la récolte manuelle provienne de cannes brûlées ou pas ; et que la récolte manuelle sans brûlis s'accompagne de dépaillage ou pas ;
- Les réglages de la récolteuse en cas de coupe mécanique, avec notamment :
 - La hauteur de coupe qui modifie la quantité de terre collectée ;
 - Le réglage de la ventilation pour éliminer la paille ;
 - La distance entre les couteaux pour modifier la longueur des tronçons de tige ;
 - La hauteur d'écimage pour quantifier la proportion de fouet éliminée ;
 - La vitesse de coupe, qui peut être mal adaptée... ;
- Le mélange variétal dont la bagasse est issu avec des variations de teneur en fibre de 4 ou 5% entre deux variétés sucrières ;
- La qualité de terre présente dans la livraison, qui dépendra du sol, du climat, des modalités de récolte et des modalités de chargement.
- La quantité de terre se retrouvant dans la bagasse qui variera en fonction de l'action nettoyante du procédé d'extraction du sucre.
- Le dispositif industriel d'extraction du sucre qui va modifier la quantité de sucre résiduel présent dans la bagasse.

On peut émettre l'hypothèse que le brûlis préalable, qui permet de livrer des cannes très pauvres en biomasse résiduelle, va également diminuer la teneur en cires (*Photo 8*).



Photo 8 : Cannes brûlées

Il est aussi possible que la récolte manuelle ou mécanique canne entière donne des fibres plus longues que la récolte mécanique cannes tronçonnées. Il est enfin possible que la masse de feuilles broyées avec les cannes modifie la qualité de la bagasse.

De nombreux facteurs sont donc susceptibles de modifier la qualité de la bagasse et de son contenu en fibre. **Les hiérarchiser et les quantifier reste du domaine de la recherche et pourrait intéresser la programmation de l'équipe 3.**

212. La granulométrie

Bernhardt (1998) a étudié la composition physique de la bagasse brute pour résoudre des problèmes liés à son convoyage mécanique. Il classe la bagasse en fibre de 0.5 à 150 mm et en poussière¹ de quelques μm à quelques mm.

Un exemple de répartition par classe de longueur est donné *Figure 13*. Il correspond aux fibres séparées par des tamis de maille successives 6,7 ; 4 ; 2,8 ; 2 ; 1,4 ; 1 ; 0,85 ; 0,6 ; 0,45 ; 0,3 et 0 mm².

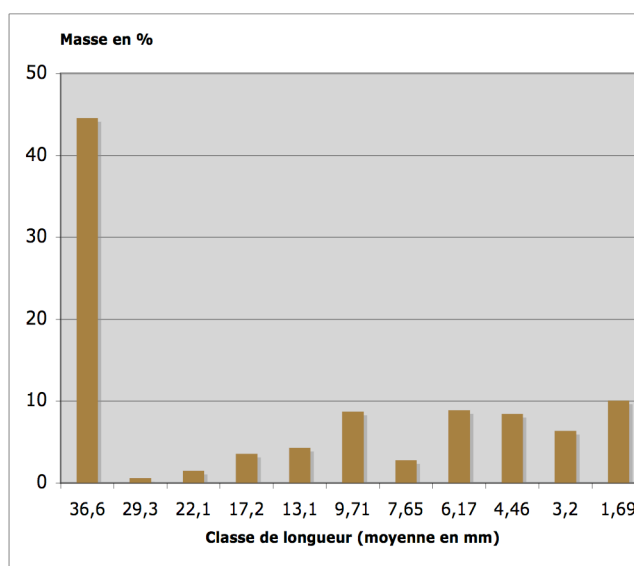


Figure 13 : Répartition massique des particules de bagasse

L'auteur détermine un «*coarse ratio*» comme le rapport entre la masse de particules de plus de 2mm et celle des particules inférieures à 0.85 mm. Ce rapport varie de 0.32 à 2.50 selon le type de bagasse. Il s'avère statistiquement pertinent pour expliquer les phénomènes de prise en masse qui provoque la formation de bouchons et de débordements lors des convoyages de la bagasse (Bernhardt, 1999).

Les masses réparties par classe de taille s'avèrent très variables d'une usine à l'autre, ce qui confirme l'influence marquée, des modalités de production, de récolte et d'extraction des jus, sur la qualité des fibres de la bagasse.

D'une manière plus générale, les pailles de Poacées sont caractérisées par une faible densité et une structure hétérogène qui ont pour conséquence la quasi-impossibilité de les broyer de manière régulière. Bridgeman et al. (2007) ont montré que les propriétés chimiques différaient selon la taille des particules issues du broyage. La composition chimique (composantes de la lignocellulose, silice, cendres, contenu énergétique...) des particules de *Panicum virgatum* et de *Phalaris arundinacea* (reed canary grass) classées en deux fractions (<90 μm et 90-600 μm) varient suffisamment pour que le broyage et le tamisage apparaisse comme un prétraitement approprié pour enrichir la matière première en composantes recherchées. Ces résultats confirment les limites qualitatives pour la fibre, du broyage dédié à la production de sucre.

¹ Les microparticules de type « poussière », préjudiciables à la santé (bagassose), sont en réalité des spores de champignons thermophiles qui décomposent la bagasse.

² Tableau issu des données citées par l'auteur.

213. Composantes de la bagasse

La bagasse est donc un produit hétérogène composée de fibres brutes de taille variable mélangées à des tissus peu ou pas fibreux, plus ou moins fragmentés. On peut extraire de manière grossière deux phases, la fibre brute et la moelle qui correspondent approximativement à trois régions remarquables de la tige : l'écorce, la moelle et la cuticule.

a. La fibre brute

La fraction la plus grosse de la bagasse est essentiellement constituée de fibres brutes. Ces fibres proviennent surtout de la partie périphérique de la tige ou écorce (*rind*). Ces fibres sont aussi présentes dans la partie médullaire de la tige mais en quantité plus limitée. Les fibres seront beaucoup plus regroupées en faisceaux (*fiber bundle*) lorsqu'elles proviennent de l'écorce où les vaisseaux sont pratiquement jointifs et soudés. Plus on s'éloigne de l'écorce vers le centre de la tige, plus le diamètre des vaisseaux augmente et leur nombre décroît (*Figure 14*).

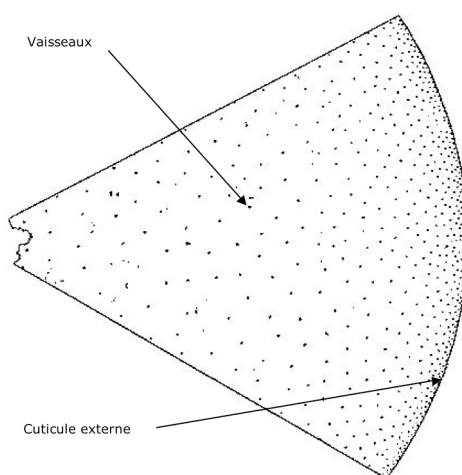


Figure 14 : Coupe d'une tige d'après [Clements, 1980](#)

La longueur des fibres brutes dépend de la cohésion des faisceaux et de la qualité du broyage. Elle peut aller de la cellule à celle de filaments constitués par des groupes de faisceaux renforcés par les liaisons ligneuses ([Gassan et Bledzki, 1999](#)). Les fibres de canne à sucre ont une longueur moyenne de 1,5 mm et un rapport longueur : largeur de 70 avec des variations en fonction de leur position dans la tige ([Sharma et al. 2000](#)) et de la longueur des entrenœuds. Les largeurs des vaisseaux unitaires s'accroissent de l'écorce au centre de la tige, tandis que leur nombre diminue.

La dimension des fibres de canne à sucre est inférieure à celle de la plupart des conifères (*softwood*). Ceci affecte la résistance au déchirement (*tearing strength*) dans le cadre d'un usage papetier. L'apport d'une fraction de pulpe de ligneux à la fibre de canne à sucre peut alors permettre de fabriquer certaines catégories (*grade*) de papiers résistants au déchirement et aux impacts.

Une autre caractéristique propre à la pulpe de bagasse est la faible opacité des papiers obtenus. La pâte de bagasse demeure cependant acceptable pour la plupart des usages papetiers. Il est d'ailleurs beaucoup plus facile d'obtenir une pâte de bonne qualité avec la bagasse qu'avec les conifères qui sont beaucoup plus riches en lignines.

b. La moelle

Les parties les plus fragmentées de la bagasse contiennent beaucoup moins de fibres. Elles ont deux origines principales : (1) le parenchyme central ou moelle (*pith*¹, *bagasse pith*, *bagacillo*) ; et (2) la cuticule cireuse épidermique.

Le sucre de la canne étant stocké dans le parenchyme central de la tige, la moelle contient la quasi-totalité des résidus de sucre qui n'ont pas été extraits par le procédé industriel. Cette localisation est importante puisqu'elle a des répercussions sur le stockage ainsi que sur les utilisations textiles qui mettent en jeu des additifs incompatibles avec le sucre.

Par ailleurs, les cellules épidermiques qui vont se retrouver majoritairement avec la cuticule cireuse sont très riches en silice, élément minéral dont la présence peut avoir une forte incidence sur les produits textiles.

La présence de parenchyme est plus importante dans la bagasse que dans la plupart des espèces ligneuses. Cette caractéristique se traduit par un taux plus élevé de cendres et de silice. La silice donne des pâtes plus abrasives (Wood, 1981). L'usage de variétés fibreuses dédiées à la fibre pourrait atténuer fortement ce défaut par un accroissement de l'écorce au détriment de la moelle, dans la mesure où la cuticule siliceuse va se retrouver en grande partie dans la moelle.

Tableau 17 : Principaux composés phénoliques dans la moelle de bagasse

Composé	μ mole
Acide coumarique	3,37
Acide Férulique	2,36
P-hydroxybenzaldéhyde	2,58
Vanilline	8,96
Acide vanillique	8,03

La moelle qui est considérée comme un déchet polluant. Elle sert de combustible. Son utilisation pour l'élevage a été envisagée au Mexique par Leal et al. (1994). Les auteurs ont déterminé les teneurs de cette moelle par HPLC² (Tableau 17). Ce travail était justifié par le fait que la plupart de ces composés sont toxiques pour les animaux à forte concentration.

3. Le démoelage

31. Introduction

Les parties les plus grosses de la bagasse sont essentiellement constituées de fibres brutes. Plus la granulométrie sera fine, plus le contenu fibreux sera faible. Nous utiliserons le terme de démoelage (*depithing*) pour caractériser les procédés de séparation de la fibre brute des parties les plus fines.

La taille des particules composant la bagasse étant très variable (Figure 13), le démoelage n'a de sens que si on se fixe une limite de trie. Cette limite va dépendre de l'usage de destination de la fibre. Le rendement au démoelage sera donc fixé par des choix techniques qui auront une incidence directe sur la qualité des produits textiles finis.

¹ Le terme « pith » s'applique généralement, par simplification de langage, aux deux composantes, moelle et cuticule. Nous employons donc le néologisme démoelage pour l'opération qui permet d'éliminer la moelle et la cuticule.

² High Performance Liquid Chromatography.

Les méthodes de démoellage ont été classées en fonction de la qualité de séparation des constituants de la tige. La première méthode dédiée à la fibre travaille à partir de tiges de canne à sucre. Le sucre est alors un sous-produit de la filière. La seconde regroupe une série de modalités de trie appliqué à la bagasse et venant donc en aval de la production sucrière.

32. Intérêt

La bagasse ne peut pas être utilisée brute pour la production de fibre. De nombreux usages nécessitent une fibre brute de qualité. Pour tous les usages « textiles » de la canne à sucre, le terme bagasse fait toujours référence à de la bagasse demoellée (Youngquist et al. 1993). Le sucre résiduel dans la moelle que contient la bagasse est chimiquement incompatible avec les résines habituellement utilisées comme liants (*binder*) dans les panneaux composites. L'élimination des sucres est donc nécessaire pour produire des panneaux de bonne qualité (Ellis et Paszner, 1994).

Notons cependant le cas particulier de panneaux de particules de bagasse sans liant (*binderless*). Ils sont obtenus par injection de vapeur à haute pression. Lorsqu'ils sont fabriqués avec la moelle, ils ont des propriétés mécaniques plus intéressantes que les panneaux de bagasse demoellée. Widyorini et al. (2005) attribuent ce résultat à une déformation plus facile de la moelle qui assure ainsi une meilleure liaison.

Pour Sharma et al. (2000), qui se sont intéressés aux usages papetiers de la bagasse de canne à sucre, la moelle doit être éliminée de la partie fibreuse, car elle constitue un milieu salissant. Elle accroît les besoins chimiques lors des procédés industriels. Elle pose en outre de nombreux autres problèmes notamment pour la réduction en pâte :

- Elle constitue une entrave la filtration et au lavage de la pâte ;
- Elle ralentie le drainage ;

La moelle provoque par ailleurs des frictions lors des pressages et elle augmente les charges de blanchiment (*bleaching*) à cause des salissures absorbées en surface.

Les auteurs listent les principaux bénéfices du démoellage pour la filière papetière :

- 40% de réduction des coûts de manutention ;
- Volume de stockage réduit ;
- Conservation améliorée lors du stockage ;
- Amélioration de la qualité des pâtes (*brightness* et *strength*) ;
- Amélioration du rendement en pâte (favorise la pénétration des composés chimiques non retenus par la moelle) ;
- Réduction des pollutions et des coûts dans les filières papetières par :
 - Une diminution de 40 à 50% des quantités de produits chimiques employées pour le pulpage et le blanchiment ;
 - La réduction la DBO (*Biochemical Oxygen Demand*) des effluents industriels et la pollution ;
 - La diminution des consommations d'eau.

Par ailleurs, les caractéristiques physiques des fibres contenues dans la moelle ont un impact négatif que la qualité du papier produit (Sanjuán et al. 2001).

33. Démoellage dédié aux fibres

Il existe un unique procédé de séparation de l'écorce, de la cuticule et de la moelle à partir des tiges non broyées. Le « procédé Tilby^{TM1} » (*Tilby separation process*), breveté par une entreprise canadienne. Développé dans les années 70-80, il est le seul procédé industriel cité dans de nombreux pays et qui couvre les usages sucriers comme textiles.

Le procédé Tilby est largement utilisé par les chercheurs qui travaillent sur les fibres de canne à sucre, notamment à l'Université de Louisiane ([Elsumi et Collier, 1996](#) ; [Romanoschi et al. 1997](#)). En dehors des procédés de laboratoire, son industrialisation est au stade pilote².

Le principe est le suivant :

- Les tiges sont nettoyées à sec, tronçonnées à 35 cm et nettoyées par voie humide pour enlever la terre résiduelle ;
- Les tronçons obtenus sont manipulés mécaniquement pour être découpées verticalement en deux parties ;
- Le mécanisme du procédé permet alors d'extraire et de séparer de l'écorce :
 - La partie intérieure molle ; puis
 - La cuticule externe.

Nous retrouvons ainsi en sortie du procédé :

- Des bandes d'écorces ;
- De la moelle sucrée avec son contenu de fibres vasculaires plus ou moins rattachées ; et
- Des particules fines composées du matériel épidermique où dominent les cires.

Les modalités de récolte conditionnent la propreté des produits finis du procédé. Le nettoyage à sec permet d'éliminer les poussières grossières et les résidus de feuilles. Le nettoyage par voie humide est destiné à éliminer la terre adhérente aux tiges. La masse de terre récoltée avec les tiges peut en effet devenir importante si les conditions climatiques sont défavorables (humidité) ou lorsque le couvert est versé.

[Laurie \(1978\)](#) donne une idée moyenne du rendement des rendements matière du procédé TilbyTM : L'écorce nettoyée qui nous intéresse correspond en moyenne à 25 % de la matière sèche de la canne à sucre. Elle contient 31 à 32 % de fibre et en moyenne 46 % de la fibre de la canne à sucre ([Tableau 18](#)).

Tableau 18 : Pourcentages des différentes parties de la tige de canne à sucre.

Détermination	Moelle	% Dans la tige	Écorce	% Dans la tige	Épiderme	% Dans la tige
% Pondérale	78-80		18-20		1.5-2.5	
% Matière sèche	27-30	72	40-42	25	42-46	3
Fibre	8-9	51	31-32	46	8-10	3
Pol	16-18	93	4-6	6	7-9	1

¹ United States Patent 5122380 de 1976. <http://www.kctilby.com>

² Une unité de 50 tc/h a été installé dans une sucrerie du Mexique. La société Tilby valorisant la production notamment par des panneaux de particule. L'unité industrielle a été démontée depuis, pour non respect des termes du contrat (communication personnelle de Rick Tilby).

L'élimination de la partie épidermique est très favorable aux procédés industriels d'utilisation des fibres. Difficile à éliminer, sa présence provoque des imperfections que l'on retrouve par exemple dans les papiers issus de bagasse. De même la présence des parties épidermiques dans la fibre réduit la qualité des panneaux composites en diminuant les forces de liaisons entre la résine et les fibres. On retrouve 30 % de la silice contenue dans la canne à sucre dans l'écorce. La composition moyenne de la fibre d'écorce de canne à sucre est proche de celle du bois (*Tableau 19*).

Tableau 19 : Compositions moyenne en % de la fibre d'écorce de canne à sucre.

Composantes	Ecorce de canne	Ligneux	Conifère
Cellulose	46	45	42
Lignine	23	23	29
Hémicellulose	26	22	22
Autre	5	10	7

La partie épidermique, isolée par le procédé, correspond à environ 2 % de la canne à sucre. Elle constitue un matériaux intéressant pour l'extraction de cires, qui contiennent notamment¹ des alcools à poids moléculaire élevé présentant d'intéressantes propriétés anti-oxydantes *in vivo* (Noa et al. 2002 ; Molina et al. 2005). Des études récentes tendraient à montrer que les polycosanols contenus dans les cires, n'ont pas par contre *in vivo* les effets « anti-cholestérol » que la recherche cubaine leur avait attribué (Francini-Pesenti et al. 2008).

Des pistes restent à explorer pour valoriser le contenu chimique complexe des cires de la cuticule. Dans le domaine de la santé, de nombreuses publications font référence au D-003, code donné à un mélange d'acides aliphatiques à poids moléculaire élevé extrait de la cire. Les essais en laboratoire mettraient en évidence des effets anti-agrégation des plaquettes, anti-cholestérol et antioxydants.

Le résidu épidermique contient aussi 90 % de la matière colorante de la canne à sucre et 60 % de la silice. Son élimination contribue en conséquence à diminuer la coloration des fibres et à réduire leur caractère abrasif. Ces caractéristiques renforcent largement les qualités de la moelle du procédé qui va être peu coloré, et pauvre en silice.

La moelle isolée permet de fabriquer directement un sucre blanc de qualité grâce à une faible capacité de coloration. Elle contient 93 % du sucre de la canne à sucre. Le rendement en mélasse du sucre de moelle est réduit de 50 % ou plus. Par ailleurs, la faible teneur en silice permet de préserver les surfaces chauffantes.

Des procédés industriels dédiés à la production de fibre de canne à sucre permettent donc de produire des fibres de haute qualité, du sucre blanc sans raffinage coûteux et des coproduits valorisables dont certains à forte valeur ajoutée (antioxydants).

34. Démoellage de la bagasse

Nous ne développerons pas les aspects techniques des procédés industriels de démoellage en nous limitant aux principes utilisés. Contrairement au procédé Tilby®, qui tient compte de la structure de la tige pour en séparer les constituants, le démoellage de la bagasse repose sur un tri dimensionnel grossier et peu spécifique des particules

¹ Les cires jouent un rôle contre la dessiccation des tissus. Elles contiennent des composés aliphatiques à chaîne longue (C21 à C35) : alcanes, alcools, aldéhydes, acides gras, triterpénoïdes...

341. Méthodes

Il existe de nombreux procédés de démoellage adaptés aux filières sucre. Ils utilisent des voies sèche, humide, liquide, combinée voir biologique. L'opération de base consiste à utiliser des marteaux pour détacher la moelle qui adhère aux fibres puis de la séparer par des tamis. Elle est réalisée soit en humide, lorsque la séparation se fait directement en sortie du moulin ; soit en sec après séchage de la bagasse en fin de phase de stockage.

Le démoellage en sec casse beaucoup plus les fibres et produit beaucoup de particules fines. Le démoellage en humide donne des fibres plus flexible et moins facile à casser. Il existe de très nombreux modèles de machine à démoeller qui fonctionnent en sec ou/et en humide. L'industrie papetière évite les démoellages en sec qui sont peu adaptés aux grandes échelles du fait des dégâts mécaniques pour les fibres et des poussières nocives.

Le démoellage en humide nécessite un investissement plus coûteux et entraîne une consommation plus importante en eau et en énergie.

L'opération de base la plus courante combine les voies sèches et humides. Elle se divise en deux étapes :

1. La bagasse brute est convoyée sur un tamis perforé à 8 mm au niveau du moulin. Elle est stockée après ce premier tri ;
2. La bagasse ainsi triée et stockée subit un second nettoyage par voie humide. Elle est lavée puis centrifugée en utilisant des paniers perforés à 5 ou 6 mm.

Des procédés biologiques de type « Ritter¹ » sont cités dans la littérature d'Afrique du sud. Ils sont développés généralement au cours du stockage. Ils ont pour but d'améliorer le rapport cellulose/lignine par des actions lignolytiques.

342. Résultats

Le résultat du démoellage de la bagasse est d'une part une fibre propre, qui peut être mis en balle et d'autre part la moelle.

La moelle est un excellent combustible qui peut compenser en grande partie voir en totalité l'énergie retirée de la bagasse par l'exportation des fibres brutes². Elle a également été testée avec succès comme ingrédient entrant dans l'alimentation animale.

Le démoellage a un effet significatif sur les propriétés physicochimiques de la fibre en modifiant le taux de fibre et le pourcentage de matière sèche soluble (*Tableau 20*). Le démoellage permet de récupérer 25 % des fibres contenues dans la moelle. Ces fibres sont par contre perdues par le procédé Tilby®.

Tableau 20 : Effet du démoellage sur la composition physicochimique de la bagasse

Bagasse	brute	Démoellée
Fibre	50	85
Moelle	35	10
Solubles	15	5

¹ Microbiologiste allemand à l'origine de très nombreux procédés industriels

² Si les fibres brute plus riche en lignines sont en principe plus énergétiques, elles sont largement excédentaires par rapport aux besoins énergétiques des procédés industriels. L'utilisation de la totalité de la moelle comme combustible comble le différentiel.

Le démoellage permet d'extraire les 2/3 du sucre résiduel et améliore la teneur en matière sèche fibreuse. Ceci contribue à améliorer l'aptitude à la conservation de la fibre lors du stockage. La composition moyenne des fibres extraites de l'écorce est de 52 % de cellulose, 30 % d'hémicellulose et 18 % de lignines (Paturau, 1969).

343. Rendement et usages

Les rendements matière du démoellage dépendent du niveau de trie qui a été choisi par l'industrie. Il va aussi dépendre des variétés et des modalités de culture. Les études conduites à Barbade tendent à montrer que les cannes «multipurpose», riches en fibre, produisent une bagasse moins hydratée et plus pauvre en « poussière » que la canne à sucre (Deboer, 2007). Les normes précédentes seraient donc à réviser si on envisage une production principale de fibre et non plus de sucre.

Atchinson (1993) estime qu'un minimum de 40 % de particules fines de la bagasse doit être enlevé pour que la fibre brute extraite conserve une bonne qualité papetière (*newsprint*). Le maximum à enlever se situe pour l'auteur autour de 50 %. Pour l'auteur, le démoellage de la bagasse est la clef du succès de son utilisation pour la fabrication de pâte de tout grade, de papier, de carton (*paperboard*) et de panneaux de fibres (*reconstituted panel board*).

La moelle représente selon Kemajuan et Persekutuan, (1969) entre 20 et 25 % de la bagasse. Setty et al. (1995) estiment qu'elle est proche de 30 %. Sharma et al. (2000) considèrent que la bagasse produite en Inde (350 kg/tc) contient en moyenne 50 à 55 % d'eau, 35 à 40 % de moelle, 15 à 20 % de fibre et 2 à 2,5 % de sucre.

La bagasse démoellée comporte encore la partie externe dure de l'écorce. Rapportée à la matière sèche, elle contient environ 0,8 % de cires (*wax*) (Sun et al, 2004). L'extraction de cet épiderme dur permet de ne conserver que la partie libéroligneuse de l'écorce à partir de laquelle vont être produit les panneaux de particule et les pâtes. Les fibres ainsi nettoyées représentent entre 18 et 20 % de la production de tige et contiennent environ 46 % des fibres contenues dans les tiges.

Dans les statistiques globales, les auteurs basent leurs évaluations de production de fibre brute, à environ 60 % de la bagasse. Les 40 % résiduels constituent un combustible de bonne qualité.

Les 270 kg de bagasse à 50 % d'humidité que produit une tonne de canne usinée pour le sucre se ventilent donc en moyenne en :

- 135 kg de bagasse brûlée pour les besoins énergétiques de la filière ;
- 135 kg de bagasse inemployée dont le démoellage va fournir :
 - Environ 80 kg de fibre brute ; et
 - Environ 55 kg de moelle énergétique.

Ces chiffres reposent sur l'approximation d'une hydratation identique de la fibre et de la moelle. L'utilisation de la moelle comme combustible libère de la fibre. Si on admet que le pouvoir calorifique de la bagasse et de la moelle sont équivalents, la production de fibre brute peut atteindre 135 kg/tc. En conclusion, la fibre brute à 50 % d'humidité représente entre 8 et 12,5 % de la production de tiges de canne usinable ; selon l'usage énergétique ou non de la moelle.

Le rendement en fibre brut des cannes fibreuses devrait être beaucoup plus élevé. Leur hydratation est plus faible (d'environ 10 points), leur teneur en fibre est supérieure

(jusqu'au double), la teneur en moelle est à priori plus faible et le rendement en biomasse totale est aussi plus élevé.

4. Le stockage

Le stockage de la bagasse a fait l'objet de nombreuses études. Quelle que soit la méthode employée, le stockage sera toujours plus efficace dans des lieux ouverts, aérés, ombragés et abrités des intempéries. Le démoellage permet de réduire le volume à stocker, de concentrer la fibre, d'améliorer la qualité du produit, de diminuer sa sensibilité à la dégradation, de réduire les risques d'incendie et de diminuer les risques de bagassose. De nombreuses méthodes de conservation ont été développées. Elles mettent en œuvre des voies humides ou sèches, du vrac ou du pressage et des traitements biologiques ou chimiques.

4.1. Nécessité

Le stockage de la fibre brute de bagasse est une nécessité. Il est destiné dans le cadre d'une rotation rapide, à constituer un volant d'approvisionnement des usines. Il doit aussi permettre d'assurer un approvisionnement industriel au cours de l'année à partir d'une production saisonnière.

Dans la plupart des zones de production cannières, la durée du stockage pour assurer le fonctionnement continu d'une industrie textile se situe entre 6 et 9 mois par an. [Sharma et al. \(2000\)](#) évoquent la nécessité en Inde d'une période de stockage de 6 à 8 mois pour répondre aux besoins de l'industrie papetière. La période de stockage doit déborder de celle de maturation de la canne à sucre pour éviter toute rupture d'approvisionnement en fibre.

Le stockage longue durée va poser d'autant plus de problèmes qu'il intervient en dehors de la phase de production du sucre, donc pendant la phase de croissance de la canne à sucre, c'est à dire en saison des pluies.

La recherche peut contribuer, au travers de l'agronomie, à accroître la période de production de fibre en la séparant partiellement ou totalement de la production de sucre. Les résultats attendus sont une réduction de la période de stockage et une meilleure qualité de fibre brute. La sélection de Poacées fibreuses et le calage des cycles de cultures permettent en effet d'envisager une production moins saisonnière¹ et une bagasse moins riche en moelle et en humidité.

Le stockage a une incidence sur la qualité de la fibre. Les diminutions de qualité, sous-évaluées lors des premiers projets papetiers, ont longtemps conduit à l'échec de l'usage de la bagasse dans l'industrie papetière. L'une des contraintes était la réduction de brillance. Le critère de coloration important pour la qualité papetière se détériore lors du stockage. Ce phénomène peut conduire à des impossibilités techniques de récupération. Lorsque le blanchiment est possible, il met alors en jeu des corrections chimiques coûteuses et polluantes. [\(Atchison, 1993\)](#)². La bagasse fraîche a une faible coloration. La blancheur (GE^3 Brightness) est alors de 40, voire 45. Le stockage humide en vrac accroît rapidement la

¹ Propositions du CIRAD pour produire de l'électricité hors campagne sucrière à Marie-Galante. Réalisations déjà effectives à Belize où la période de production d'électricité porte sur la culture de variétés fibreuses provenant de Barbade.

² Ces chiffres ont plus de 10 ans. L'amélioration continue de l'industrie papetière, rendue nécessaire par les contraintes environnementales (limitation des ressources ligneuses) ont contribué à résoudre ce problème.

³ La luminosité (brillance ?) est mesurée par la quantité de lumière réfléchie sur une feuille de papier. L'échelle va de 0 à 100. Elle a été définie sous le terme GE par la Pulp and Paper Industry (TAPPI). En dehors, il s'agit d'une norme ISO.

couleur. La blancheur peut perdre 20 points et s'établir à 20-30. Ce niveau est impropre à la fabrication du papier. Le blanchiment lorsqu'il est possible doit conduire la pâte à un GE de 55 à 60 pour une qualité acceptable de papier.

On dispose aujourd'hui de la technicité nécessaire pour produire n'importe quel type de papier à partir de la bagasse si les conditions de stockage permettent de limiter les dégradations.

Certains auteurs considèrent que le stockage permet aussi de faciliter le défibrage. La bagasse fraîche contient des fibres rigides qui rendent les procédés papetiers difficile et peu efficace du fait d'une adhérence de ces fibres avec l'épiderme et la moelle. Le stockage supprime ces contraintes.

Indépendamment de cet effet spécifique sur la qualité papetière, le milieu de stockage favorise des processus biologiques qui affectent la longueur, la ténacité et la couleur des fibres. Les caractéristiques de la bagasse qui sont importantes pour la conservation sont :

- L'humidité résiduelle ;
- Le contenu énergétique et fermentescible ; et
- La faible masse volumique (coût) et la surface massique élevée (fermentation).

42. Principales contraintes au stockage

421. L'humidité

L'hydratation des fibres dépend des variétés, des conditions climatiques et des modalités de récolte (manuelle ou mécanique ; dépaillage ou non ; brûlage ou non ; temps de stockage post récolte au sol...). Les normes moyennes d'humidité (*Tableau 21*) que nous indiquons, sont issues d'études conduites à Puerto Rico par [Alexander \(1986\)](#), ainsi qu'en Colombie par [Briceño et al. \(2002\)](#).

L'humidité de la bagasse n'est pas un facteur contrôlable par la filière, en dehors du choix variétal, voir de quelques ajustements du cycle de culture, ou de quelques dysfonctionnements à proscrire (récoltes en période pluvieuse, problèmes au niveau des moulins...).

Tableau 21 : Caractérisations de l'humidité en % des différentes parties de la canne à sucre.

Parties de la plante	Alexander	Briceño
Bouts blancs (extrémité non usinable des tiges)	80-88	78,6
Tiges usinables	70-75	
Feuilles adhérentes aux tiges	18-30	
Résidus au sol (feuilles et tiges mortes)	15-18	
Feuilles vertes		65,7
Feuilles mortes		11,9

L'humidité de la bagasse produite varie au maximum de 4 à 5 %. Ces écarts qui ne joueront pas de manière significative pour un usage de la fibre sont cependant importants pour l'usage énergétique. L'achat de la bagasse pour la production d'électricité se fait généralement à 50 % d'humidité, avec des dispositifs de bonus ou de malus en deçà ou au-delà de cette valeur médiane.

[Andrade et al. \(2003\)](#) mettent en évidence l'importance de la variabilité de la teneur en matière sèche dans des sélections de canne à sucre destinées à l'élevage (*Tableau 22*).

Tableau 22 : Distribution de la matière sèche de 39 cultivars en sélection¹

Classes MS %	Nb. de cultivars	MS moyenne %
[20-30[	2	22,5
[30-35[	10	33,1
[35-40[	9	37,4
[40-45[	14	43,0
[45-50[	2	48,3
[50-55[	2	52,6
Total	39	38,6

Les cultivars fibreux présentent un intérêt potentiel certain, du fait de leur plus faible teneur en eau.

422. La fermentation

La bagasse, outre son hydratation, contient entre 1 et 3 % de sucres résiduels, que les procédés industriels des sucreries ne peuvent extraire.

La biomasse résiduelle est elle aussi fermentescible. Elle contient en effet des tiges non récoltées. Les pertes sont de 5 à 7 % de la production lorsque la récolte est bien maîtrisée et que la culture n'a pas versé. La biomasse résiduelle contient donc un minimum de 4 à 7 t/ha de tiges commerciales pour des rendements de 80 à 100 t/ha de canne à sucre. Les procédés en cours de mise au point de collecte de la biomasse résiduelle s'accompagnent généralement d'un broyage. La paille de canne à sucre pourrait donc constituer un milieu être riche en sucre.

La bagasse de canne à sucre humide stockée en vrac, fermente rapidement en produisant de l'alcool puis de l'acide acétique, du fait de la présence de bactéries, d'oxygène, d'eau, de sucres et d'hémicelluloses. La quantité de chaleur produite par cette fermentation est considérable. Selon les conditions d'aération, la bagasse pourrait atteindre des températures de l'ordre de 70° C. Il en résulte une déshydratation importante avec en diminution de l'humidité de 50 % à 30 % dans un délai d'une trentaine de jours.

Une étude conduite à Trinidad, dans le cadre d'une unité de fabrication de panneaux de particules de bagasse, permet de caractériser les pertes importantes en masse et en qualité des processus de dégradation liés au stockage (Liese et Walter, 1978). La dégradation débute par un accroissement thermique provoqué par les levures en présence de sucres et d'eau. Des bactéries thermophiles vont alors désagréger les tissus en lysant les pectines des couches intercellulaires, puis les hémicelluloses. Des champignons vont enfin se développer au détriment des hémicelluloses, de la cellulose puis des lignines. Les auteurs ont identifié un total de 70 micro-organismes intervenant dans cette décomposition.

Lacey, 1974 étudiant des échantillons de bagasse brute conditionnée en balles issues d'une dizaine de pays producteurs à travers le monde, identifie à partir des spores issus de bagasse fermentée des bactéries et champignons thermophiles. Parmi ceux-ci figurent deux actinomycètes dont les spores sont à l'origine de la bagassose. Il y trouve également des organismes cellulolytiques qui provoquent une dégradation des fibres. La chaleur de fermentation permet d'évacuer environ 25 % de l'eau contenue dans la bagasse. L'auteur préconise un traitement de la bagasse à l'acide propionique diluée (0,6 %) pour limiter la détérioration de la fibre et prévenir les risques de bagassose.

¹ Tableau établi d'après les résultats publiés par les auteurs.

Le processus de décomposition de la bagasse n'est pas très rapide. La cellulose est en effet bien protégée par l'hémicellulose et les lignines.

423. La densité

La faible densité de la bagasse entraîne des contraintes de volume qui affectent les dimensions des lieux de stockage et les opérations de manipulation.

Selon les données de la [Sugar Engineers Library](#)¹, la masse volumique moyenne de la bagasse est de 120 kg/m³ en sortie de moulin. Elle est de 176 lorsqu'elle est stockée en tas de 2 m de hauteur (44 % d'humidité). Les parties résiduelles laissées au sol peuvent aisément être collectées. Les méthodes et coûts associés sont traités par ailleurs ([Pouzet et Lejars, 2008](#)).

Les informations disponibles sur la densité de la biomasse résiduelle ([Tableau 23](#)) proviennent d'estimations brésiliennes ([Hassuani et al. 2005](#) ; [Tolentino et al. 2007](#)) et concernent une biomasse résiduelle sèche accessible à une collecte mécanique.

Tableau 23 : Densité de la biomasse laissée au sol après récolte de la canne à sucre

Auteurs	Variété	t/ha résidus	Humidité %	Densité kg/ m ³	Volume m ³ /ha
Hassuani	RB 72454	23,73	47,8	29,4	807,12
	RB 806043	21,00	49,7	35,5	590,95
	RB 855536	26,90	48,7	32,9	818,30
Tolentino	SP791011	24,10		29,6	814,58
	RB855113	29,90		30,1	994,34

Un volume de 1 m³ de biomasse résiduelle fraîche ne pèse donc qu'entre 29 et 36 kg selon la variété. Un processus de mise en balle lors de la collecte est donc indispensable pour assurer le transport et la manutention dans des conditions économiques acceptables.

Des études de compressibilité des pailles de canne à sucre ont été conduites à Cuba, afin de déterminer les rapports entre la pression de compaction et l'humidité de la paille ([Urquijo et Gonzalez, 1998](#)).

43. Quelques méthodes de stockage

431. La voie humide

La voie humide est souvent qualifiée de méthode de Richter, du nom d'un microbiologiste qui a initié le procédé. Le stockage peut être réalisé en vrac, avec de la bagasse de préférence démoellée, maintenue en milieu humide saturé. L'humidité est maintenue à 80% par arrosage, pendant toute la durée du stockage. Le milieu est maintenu en anaérobiose. Il est ensemencé par des lactobacilles pour éliminer les résidus de sucre.

Cette méthode qui prévient de tout incendie est souvent évoquée dans la littérature. De nombreuses variantes sont proposées avec l'usage d'acide formique ou de mélasse.

Globalement, la voie humide s'avère coûteuse en énergie, en eau et en pollution (DBO des eaux de drainage, effluents volatils). Elle provoque en outre un brunissement des fibres et une perte de brillance en surface.

De nombreuses variantes de cette voie ont été étudiées, notamment en Afrique du sud ([Morgan et al. 1974](#)). Les améliorations essentielles apportées concernent le contrôle du pH

¹ <http://www.sugartech.co.za>

et la gestion des eaux de drainage. La conservation humide était largement employée dans les années 1970, notamment en Afrique du Sud, en Argentine et au Brésil. Nous n'avons pas trouvé de publications récentes sur le sujet.

432. Les voies sèches

Le stockage par voie sèche met en jeu un séchage biologique ou chimique avec de nombreuses variantes. Selon [Chapman \(1956\)](#), les balles de bagasse séchées peuvent être stockées à l'extérieur pendant plusieurs années. L'auteur ne fait cependant pas référence aux modifications de qualité que nous avons évoquées pour le papier.

a. Séchage biologique

Cette voie, déjà évoquée ([Ch.IV-§322](#)), consiste à sécher en 3 à 4 semaines la bagasse démoellée à 50 % d'humidité et pressée sous forme de balles. Le séchage est obtenu grâce aux réactions exothermiques de conversion des sucres en acide. Les balles sont alors stérilisées par l'accroissement de température. La méthode impose un démoellage à sec et des coûts énergétiques de mise en balle. La chaleur dégagée par les balles s'accroît de manière importante, tandis que des fermentations méthanogènes se développent. Pour lutter contre les risques d'incendie, les balles sont disposées de manière à assurer une bonne aération. Certaines variantes portent sur des balles dans lesquelles on a formé un trou central destiné à favoriser l'aération.

Il existe une liste impressionnante d'additifs biologiques ou chimiques destiné à améliorer ou de contrôler les processus de fermentation. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : des ferments commerciaux destinés à accroître la vitesse de transformation des sucres en acides ; des inhibiteurs d'invertase ; des inhibiteurs du cycle des levures ; des facteurs influant sur la perméabilité des levures ; des agents oxydants ; des conservateurs comme le méta bisulfite de sodium...

[Conçalves et al. \(2002\)](#) et [Costa et al. \(2002\)](#) montrent que le champignon *P. tigrinus* (souche FTFR-4745) développé sur bagasse accroît l'activité enzymatique (xylanase) et cause une délignification qui préserve les propriétés des fibres. Les auteurs concluent qu'un tel prétraitement peut réduire de manière significative la charge chimique lors de la fabrication de pâte.

[Agblevor et al. \(1994\)](#) ont étudiés à Hawaï, dans le cadre d'une installation de pyrolyse, l'influence du stockage de la bagasse en piles de 3 m de haut sans protection externe. Le stockage le plus long, pendant 26 semaines, avec 300 mm de pluies et des températures de l'air 23-30° C ne modifie pas le rendement pyrolytique si l'on fait exception d'une couche superficielle de 10 cm qui constitue une protection sacrifiée. Les teneurs de la zone protégée en pentoses, hexoses et lignine n'est pratiquement pas modifié. Par contre, la partie superficielle ont une diminution marquée en pentoses et hexoses et une teneur consécutive plus élevée en lignines.

b. Séchage physique

Le stockage peut être effectué en vrac après séchage artificiel. La fibre est portée à 20 % d'humidité. Les procédés de séchage sont très divers. Ils nécessitent des niveaux d'investissement variables en rapport avec les masses à traiter. Le séchage peut être réalisé par lit fluidisé, par séchoir rotatif, par pressage à l'aide de vis... L'énergie à mettre en œuvre varie selon que le démoellage a été réalisé par voie sèche ou voie humide.

Les possibilités de sécher la bagasse par la vapeur issue d'unité de cogénération a été étudié en Australie ([Morgenroth et Batstone, 2006](#)). Les résultats sont intéressants puisqu'ils

permettent un surplus énergétique de 40 à 50 KWh par tonne de canne. La bagasse est portée par le processus de 50 à 10 % d'humidité. En dehors de l'usage énergétique, ce procédé peut être envisagé pour stabiliser la fibre produite à proximité d'une unité de cogénération.

Une variante porte sur la réduction de l'humidité de la fibre de 50 à 40 % par un préséchage utilisant de l'air à 200° C dans un cyclone à lit fluidisé. La fin du séchage se fait biologiquement.

433. Comparaisons et évolution

Sharma *et al.* (2000) ont comparé les différentes méthodes de conservation de la fibre de bagasse pour un usage papetier (Tableau 24).

Tableau 24 : Quelques méthodes de conservation des fibres de bagasse

Méthode	Humidité %	Commentaires	Classe
Vrac, séchage	10	Meilleure préservation mais coûteux	+
Balle sans séchage	50	Coût de la mise en balle et de la gestion	++
Vrac humidifié	80	Bonne préservation des parties internes, très polluant	
Vrac sans séchage	50	Bonne préservation liée à l'anaérobie. Partie externes perdues	+++

La bagasse mal conservée, dont la qualité est insuffisante pour l'industrie papetière demeure utilisable pour la fabrication de panneaux de fibre (*fiber board*).

434. Cas particulier de la biomasse résiduelle

Peu d'information sont disponibles à propos du stockage de la biomasse résiduelle. De nombreuses recherches sont cependant en cours du fait de l'importance que cette biomasse délaissée par les filières traditionnelles, représente dans des domaines liés à l'énergie ou à l'élevage. Les interdictions de brûlage de ces résidus, actuels (Colombie) ou programmés (Brésil), engendrent par ailleurs des problématiques de gestion.

À La Réunion, la collecte se fait par presse mécanique, après séchage au sol. Le séchage au soleil permet, selon les conditions climatiques locales (humidité, nébulosité...) de diminuer l'humidité de 65-70 % lors de la récolte, à 35-45 % en 3 ou 4 jours, soit un peu moins que la bagasse sortant du moulin.

Les essais conduits en Colombie (Briceño *et Torres*, 2001) sur des stockages en piles ouvertes ou couvertes montrent que les résidus hachés à 2mm atteignent des températures et des pH plus élevées que la bagasse, les valeurs les plus élevées sont obtenues sous couvert. Les températures sont atteintes plus rapidement et se maintiennent plus longtemps. Les auteurs n'ont pas noté de détérioration particulière durant le stockage. Les niveaux de températures indiquées par la littérature lors des stockages de la bagasse (autour de 70° C) ne sont pas atteints. Les résultats sont cependant encourageants en matière de séchage et de conservation.

Au Brésil, Saad *et al.* (2008) ont étudié l'effet d'un bio-prétraitement fongique des pailles de canne à sucre par un basidiomycète (*Ceriporiopsis subvermispora*) pour délignifier partiellement le substrat et produire des pâtes par la méthode organosolve (Ch.V-§524). Les pertes en lignines sont importantes avec une charge en mycélium de 250 mg/kg de paille et une incubation de 30 jours. Cependant, les pertes en cellulose sont jugées trop importantes pour industrialiser le procédé.

435. Quelques données économiques

L'usage de la bagasse et plus globalement de la biomasse résiduelle est le plus souvent limité à la zone de production et de transformation. En l'absence d'alternative économique, la bagasse est destinée à des usages primaires à faible valeur ajoutée que sont la combustion, l'alimentation animale en période de déficit fourrager et la restitution au sol.

Bien que les informations économiques soient difficilement extrapolables dans le temps et dans l'espace, quelques données peuvent permettre de se faire une idée relative de l'intérêt de la bagasse pour des usages autres que primaires.

L'usage croissant de la bagasse dans l'industrie papetière indienne repose en partie sur le fait que la pâte de bagasse revient à 44 \$/t alors que la tonne de pâte de bambou est à 72 \$ et celle d'eucalyptus à 93 \$ (Kothari, 1997). Ces estimations sont basées sur une production d'une tonne de pâte à partir de 5,5 t de bagasse brute (non démoellée). Le prix de la bagasse à 50 % d'humidité était de 8 \$/t brute et 15 \$/t après démouillage. Avec un coût de démouillage au niveau du moulin de 4 \$/t, l'opération conduit à un bénéfice de 3 \$/t auquel s'ajoute l'utilisation de la moelle comme source d'énergie.

En Australie, où le déficit en ressources ligneuses papetières se pose comme en Inde, Rainey (2009) estime que la bagasse est valorisée entre 30 et 50 \$ la tonne par la cogénération lorsque les régulations économiques gouvernementales et les crédits carbone sont pris en compte. La valeur commerciale pour le papier atteint pratiquement le triple. Elle se situe entre 80 et 150 \$ par tonne en fonction de la nature du produit fini.

L'industrie papetière, comme la plupart des industries agro-industrielles sort progressivement des problématiques d'économie d'échelle. Cependant, le seuil de rentabilité d'une unité industrielle de production de pâte Kraft¹ était encore estimé à 500 t de pâte par jour courant 2008.

Il existe aujourd'hui de nombreux pilotes, notamment en France². Une usine de bioraffinage valorisant la cellulose sous forme de papier les lignines sous une forme « linéaire » et les hémicelluloses, sous forme de xylose, sera opérationnelle dans la Marne en 2011. Elle sera alimentée par 180 000 t de paille de céréales par an collectée selon des principes de bonne gestion de la fertilité des sols. De telles unités sont développées au niveau du pôle de compétitivité IAR³ (Vandeputte, 2007).

Aujourd'hui, les choix dans le dimensionnement des filières agro-industrielles reposent de plus en plus sur la prise en compte de l'ensemble des externalités. Les coûts environnementaux et sociaux conduisent ainsi à repenser un dimensionnement des filières autrefois basé uniquement sur le rendement industriel.

¹ Procédé le plus répandu utilisant du sulfate de sodium et un traitement thermique à 170-175°C pendant 2 à 5 heures.

² Voir le dossier de presse « Les bioraffineries CIMV » : www.cimv.fr

³ Pôle de compétitivité des régions Champagne-Ardenne et Picardie : Industries et Agro-Resources. <http://www.iar-pole.com/fr>

V. USAGES ET PROCÉDES INDUSTRIELS

Nous abordons dans ce chapitre quelques usages dominants des fibres brutes ou raffinées dont la plupart ont déjà été évoqués (*Ch.III-§4*).

Nous présentons une brève caractérisation des usages de la bagasse brute, puis les grands principes des procédés de défibrage sans être exhaustif. Notre objectif est d'apporter les informations qui permettent de concevoir une approche qualité des fibres des Poacées.

1. Principaux usages

Rappelons qu'en dehors des fibres, sujet de cette note, les usages reposant sur la décomposition de la lignocellulose ont une importance particulière dans les domaines de l'éthanol de seconde génération et des industries biotechniques. Dans le seul domaine des produits issus de la fermentation, Pandey et al. (2000) donnait une liste de 54 micro-organismes cultivés sur bagasse, par voie solide, humide ou liquide. Les productions les plus intéressantes étant alors des enzymes, des acides aminés et des médicaments.

Les principaux produits issus des fibres de canne à sucre concernent la papeterie et les matériaux de construction. Les filières papier et biomatériaux constituent une réponse pertinente à la raréfaction des ressources forestières. Nous ne disposons pas de statistiques sur la production de biomatériaux à partir de bagasse. Notons cependant qu'une étude du département américain de l'agriculture sur les fibres autres que le bois cite 255 fois la bagasse pour les matériaux de construction (Godshall, 2005). La fabrication de papier absorbe aujourd'hui 10 % de la production mondiale de bagasse¹. En Inde, 20 % du papier produit en est issu. La pulpe de bagasse, base de l'industrie papetière, alimente aussi l'industrie de la rayonne et celle des fibres de cellulose destinées au renforcement des polymères. Ainsi, on trouve par exemple sur le marché des balles de 250 kg de pulpe de bagasse produite par des groupes sucriers Thaï².

Les produits finis, issus de la fibre de canne à sucre proviennent soit de la bagasse brute démoellée, soit la fibre préalablement extraite de la bagasse :

- De nombreux biomatériaux sont directement fabriqués à partir de bagasse démoellée, c'est-à-dire de fibre lignocellulosique brute. Ce matériau sert généralement de remplissage.
- Des produits élaborés, comme les géotextiles, les dérivés de l'industrie papetière (papier, cartons...) ou les nanofibres sont par contre fabriqués à partir de fibres élémentaires et nécessitent un défibrage de la bagasse démoellée.

Les techniques de défibrage sont dédiées aux usages et ne peuvent en être dissociées. Nous présentons ici les grands principes des procédés de défibrage qui sont mis en œuvre pour la bagasse de canne à sucre.

¹ Ces statistiques ont une dizaine d'années. Nous n'avons pas trouvé de données plus récentes en dehors de celles de la FAO où quelques pays producteurs importants sont absents.

² <http://www.asia.ru/ProductInfo/521776.html>

2. Utilisation de la fibre brute

L'extraction des fibres n'est généralement pas nécessaire pour la fabrication de panneaux. La bagasse démoellée peut être une ressource de base des panneaux de particule (*particle board*), des panneaux de fibre (*fiberboard*) de panneaux isolants (*insulation board*), de produits moulés par pression à chaud (*compression molding by heating*)... Ces matériaux sont utilisés dans l'industrie, la construction et l'habitation.

D'une manière générale, les fibres lignocellulosiques ont un intérêt important pour fabriquer des matériaux composites biodégradables en remplacement des plastiques dans le segment des conteneurs et de l'emballage qui absorbe 30 à 40 % de la consommation mondiale de plastique.

Les fibres lignocellulosiques ne peuvent être utilisées seules pour la fabrication de panneaux. Leurs caractéristiques mécaniques ne le permettent pas, notamment du fait de leur stabilité dimensionnelle faible et d'un manque de thermoplasticité (Cinelli et al. 2008).

Les fibres naturelles sont par ailleurs caractérisées par une forte absorption d'humidité, une faible mouillabilité (*wettability*), un haut niveau d'absorption d'énergie et une faible adhésion fibre-matrice (*fibre-matrix*).

Les panneaux de fibre et de particules utilisent des liants (*bonding agent, binder*). Ces résines de liaison sont le plus souvent de type urée formaldéhyde pour les panneaux industriels et d'intérieur. Il s'agit des résines les moins onéreuses. On leur préfère les résines plus coûteuses, de types phénoliques ou mélanine, pour les panneaux exposés à l'humidité ou pour des usages externes.

Le furfural synthétisé à partir des hémicelluloses de bagasse est le point de départ de nombreuses résines.

Des recherches déjà évoquées (Ch.III-§421) se développent pour utiliser les phénols des lignines comme matériaux de base des résines de liaison. Les études de Maldas et Kokla (1991) ont montré que l'addition d'un agent couplant comme la lignine de bagasse, améliore les qualités mécaniques des panneaux. Les études de Jane et al. (2002) montrent que la résistance aux impacts de panneaux de résine formaldéhyde est maintenue après substitution de 40% de la résine par de la lignine de bagasse. Rappelons que les lignines de canne à sucre peuvent se substituer entièrement aux phénols des résines issues de la pétrochimie (Hoareau et al. 2006).

La principale difficulté rencontrée pour renforcer les polymères par des fibres naturelles de bagasse, provient de l'incompatibilité entre :

- Les caractéristiques hydrophobe et non polaire des polymères ; et
- Les caractéristiques hydrophile et polaire des fibres.

Il en résulte une faible adhésion et des caractéristiques mécaniques médiocres (Ashori et Nourbakhsh, 2008). Les auteurs proposent l'utilisation d'agents d'adhésion aptes à se lier aux deux composés. Pasquini et al. (2006) proposent pour les mêmes raisons un traitement chimique de surface (estérification) des microfibrilles de celluloses de bagasse pour les associer fortement à des matrices polymères hydrophobes. Un traitement alcalin est selon Folks (1982) la méthode la plus efficace pour renforcer l'adhésion.

Les fibres de bagasse utilisées sans traitement dans des composites biodégradables accroissent les caractéristiques mécaniques du matériau jusqu'à une teneur de 65 %. Un traitement par une solution de soude à 1 % améliore de 13 % la résistance à la traction et de 14 % la résistance à la flexion (Cao et al. 2006).

Des recherches technologiques portent actuellement sur l'amélioration de la qualité et de la résistance de surface de ces biomatériaux fibreux.

Parmi les technologies développées pour fabriquer des biomatériaux de bagasse, certaines sont basées sur le thermo pressage ou de l'extrusion. De multiples procédés proposent des matériaux constitués de fibres de canne à sucre remplies de polymères thermoplastiques (matériaux de charge).

Un grand nombre d'usines (Egypte, Pakistan, Equateur...) produisent des panneaux répondant à un marché local. La qualité est généralement en deçà des standards internationaux. La qualité a été très longtemps un frein au développement de cette catégorie de biomatériaux, qui ne pouvait rivaliser avec le contre plaqué ou les panneaux de particule de ligneux.

Une industrie de fabrication de panneaux de fibre de bagasse a été implantée à La Réunion en 1966 par les sucreries de Bourbon. Elle a fonctionné jusqu'au milieu des années 80. La fabrication a cessé car le produit, sensible à l'eau, ne répondait plus aux demandes du marché.

Des procédés sont au point pour construire à partir de bagasse, des matériaux de couverture substituables aux tôles ondulées (Bryant, 1978). La technologie est bien adaptée aux conditions africaines. Elle nécessite peu d'intrants, utilisant du polystyrène comme liant et du travail manuel.

Les recherches faites dans ce domaine sur des sources différenciées de lignocelluloses (Cook et al. 1978) montrent l'intérêt de la bagasse de canne à sucre (Tableau 25) sur d'autres matériaux après des tests de flexibilité, de tension et d'exposition climatiques programmée (1000 heures de cycles « eau humidité température »).

Tableau 25 : Résistance à la traction (tensile strenght) en MPa de composites polystyrène/fibre

Remplissage	Initiale	Après 1000h	Résistance résiduelle %
Bagasse de canne à sucre	23,45	11,37	48
Sciure (sawdust)	25,52	9,66	38
Bambou	13,79	0,00	0
Coque de coco	21,03	1,72	8
Paille de riz	15,52	1,72	11
Aucun	23,79	6,89	29

Les estimations de substitution possible du bois par la fibre de type bagasse de canne à sucre sont de l'ordre de 90 %. Ceci est particulièrement intéressant en Afrique où le bois tend à disparaître dans des zones favorables à la culture des Poacées et où les moyens de transport et de transformation rendent aléatoire et difficilement rentable l'usage des forêts des zones humides.

La bagasse est fréquemment utilisée pour des panneaux de construction très appréciés pour leurs qualités acoustiques (Chawla, 1998). La bagasse et les fibres de bois entrent dans la composition la plupart des panneaux de particule de l'industrie du bâtiment par un procédé similaire à celui de la fabrication du papier. Les propriétés de mouillabilité, de résistance à la compression et à la flexion de composites constitués de fibres de bagasse et de polystyrène dépendent du taux de fibre et de leur dimensionnement (Bakri et al. 2008).

Nous n'avons pas développé les aspects économiques liés aux produits transformés. Notons cependant pour donner une indication de productivité les chiffres de Somani et Grewal (1995). Il faut selon les auteurs 3 tonnes de bagasse humide pour fabriquer une tonne de panneau de particule.

3. La défibrage

Le défibrage a pour objectif de d'extraire de la bagasse de canne à sucre, la fibre élémentaire, qui correspond à la cellule.

51. La fibre élémentaire

Structurellement, les fibres sont des cellules tabulaires. Leur résistance (*strength*) et leur rigidité sont liées à la dimension de la lumière cellulaire (*lumen*) et à l'épaisseur de la paroi cellulaire :

- Les fibres à parois cellulaires épaisses et lumen petit restent rigides dans les pâtes et ont des surfaces de contact réduites. Elles donnent des papiers raides (*stiff*) et rigides ;
- Les fibres à parois fines et lumen large donnent inversement des papiers très résistants.

Une synthèse sur l'usage papetier des lignocelluloses (Wood, 1981) permet de situer les caractéristiques cellulaires de la bagasse de canne à sucre par rapport à d'autres productions ligneuses (Tableau 26).

Tableau 26 : Dimensions en des fibres « ultimes » de quelques cultures

Espèces / résidus	Longueur (mm)	Largeur (μm)	Largeur du lumen (μm)	Epaisseur de la paroi (μm)
Bagasse de canne à sucre	0,3-3,4	9-45	16	5
Paille de riz	0,5-2,5	4-15	3	3,5
Conifère	2,5-7,0	33-35	26-28	3,6
Ligneux	0,34-2,07	10-50	11-26	2,5-4,0

Lors du procédé de pulpage, les groupes de fibres sont dissociés en fibres individuelles. La dimension optimale pour la fabrication du papier serait de l'ordre de 3 mm¹. Une longueur de l'ordre de 2,5 cm est nécessaire pour la fabrication de textiles non-tissés (Elsumi et Collier, 1996). Il est nécessaire de conserver une partie des ciments (hémicellulose et lignines) pour conserver une longueur significative aux fibres.

Les fibres élémentaires de la partie corticale de la tige de canne à sucre, extraites par procédé Tilby®, ont des longueurs maximales de 2 à 4 mm (Collier et Arora, 1996), ce qui les rend inaptes aux procédés textiles. Une étude de la FAO sur la fabrication de papier (Pande, 1978) indique que les fibres de bagasse privées de leur moelle ont une longueur de 1 à 1,5 mm et un diamètre moyen de 24 μm.

La longueur moyenne des fibres de bagasse varie selon les auteurs, vraisemblablement du fait d'une variabilité variétale et des modalités de broyage des tiges et de démoellage de la bagasse. Cette longueur est de l'ordre de 1,5 mm (Sharma et al. 2000). Setty et al. (1995) indiquent une longueur moyenne entre 1 et 1,5 mm pour un diamètre de 20 μm. Les auteurs qualifient la fibre de bagasse de canne à sucre, de fine et de flexible. Le rapport entre la longueur et le diamètre de la fibre permet de fabriquer des papiers de très bonne qualité.

Sanjuán et al. (2001) ont comparé les caractéristiques des fibres de bagasse issues de la bagasse demoellée et de la moelle. Ces dernières sont caractérisées par un diamètre plus

¹ Chiffre approximatif car lié à la nature du papier.

important et une épaisseur des parois plus fine. La moelle est aussi plus riche en cendre avec une teneur de 5,4 % comparée aux 1,1 % des faisceaux de fibre.

L'élimination de la moelle avant le pulpage est donc souhaitable pour la qualité du papier fabriqué. Les données indiquées (*Tableau 27*) caractérisent des bagasses de canne à sucre du Mexique. Les auteurs estiment que les caractéristiques de la partie fibreuse ne sont pas ou sont peu adaptées à la fabrication de papier résistant, du fait d'un rapport entre la longueur et le diamètre des fibres autour de 55.

Tableau 27 : Dimensions comparées de la bagasse démoellée et de la moelle

Fraction	Nature	Longueur (mm)	Largeur du lumen (μ m)	Epaisseur de la paroi (μ m)	Diamètre des cellules (μ m)
Faisceaux	Fibre	1,13 (0,56)*	12 (1,42)	4,0 (1,11)	20,0 (3,62)
	Vaisseaux	1,23 (1,21)	75 (2,54)	2,7 (0,26)	80,4 (6,87)
Moelle	Parenchyme	0,29 (0,01)	57 (3,57)	1,7 (0,17)	60,4 (4,51)

* Standard déviation entre parenthèse

Quels que soient les auteurs, les fibres de bagasse sont classées par l'industrie papetière dans le groupe des fibres courtes. Cette caractéristique était considérée par [Giertz \(1963\)](#) comme un avantage important sur les fibres longues, pour la fabrication de papier. [Khristova et al. \(2006\)](#) étudiant l'amélioration de méthode de pulpage et de blanchiment, indiquent que les caractéristiques et les indicateurs morphologiques des fibres de bagasse de canne à sucre démoellée sont meilleures que celles des feuillus utilisés pour produire des pâtes commerciales.

Les microfibrilles de cellulose sont aujourd'hui très étudiées en substitution aux fibres de verre du fait de qualités favorables dont la faible densité, le caractère renouvelable, une large disponibilité, une faible abrasivité...

52. Les procédés de défibrage

521. Introduction

Les méthodes industrielles et les brevets développés autour de la problématique de défibrage sont innombrables. Il existe des procédés génériques, d'autres adaptés à une bioressource. Les trois grands types de méthode mises en œuvres, qui sont physiques, chimiques et enzymatiques sont le plus souvent combinées entre elles. Un procédé à priori simple comme l'explosion à la vapeur est éminemment variable selon les sources bibliographiques consultées. Les variantes portent sur des différences de prétraitement de la bagasse, sur la nature et la concentration des additifs chimiques, sur la température et le temps d'exposition.

Par ailleurs, de nombreux procédés ont été conçus non plus pour séparer les composantes de la lignocellulose ou d'en extraire une, mais en vue de produire des molécules spécifiques, avec un rendement industriel acceptable¹ (température, pression, réactifs...).

Les exemples que nous citons ne sont donc qu'indicatifs et destinés à montrer les moyens à mettre en œuvre pour décomposer la lignocellulose et les résultats recherchés ou obtenus.

¹ De nombreux brevets font référence à l'extrusion bi-visse qui permet de combiner pression, température et apport chimique.

522. Objectifs

Le défilage a pour but de séparer les fibres des faisceaux qui les regroupent. La finesse de cette séparation va dépendre essentiellement des usages recherchés. La cohérence des faisceaux de fibres est assurée par la lamelle moyenne et la matière intercellulaire. L'opération va donc consister à détruire ces jonctions par des voies mécaniques thermiques ou chimiques.

Le résultat théorique recherché est la fibre élémentaire qui correspond à la cellule. Les procédés de défilage doivent permettre d'individualiser cette fibre élémentaire sans la détériorer, c'est-à-dire en conservant ses qualités mécaniques et sa couleur ; voir en améliorant ces qualités (souplesse).

Les procédés retenus par l'industrie, sont ceux qui permettront d'atteindre, dans des conditions économiques (et écologiques) acceptables, des fibres avec des caractéristiques qualitatives les plus conformes à l'utilisation recherchée. À titre d'exemple, la teneur en lignine résiduelle dans la cellulose de bagasse extraite pour produire des acétates de cellulose diminue la solubilité et accroît l'opacité du produit fini (Shaikh et al. 2009). Les procédés doivent donc être adaptés aux caractéristiques des fibres à traiter. Ils sont donc spécifiques aux fibres de Poacées, représentées par la bagasse et la paille de canne à sucre.

523. Actions mécaniques et biologiques

Les défilages mécaniques et biologiques sont juste mentionnés pour mémoire.

Le défilage mécanique de la bagasse n'est pas dédié à la production de fibre. L'action mécanique est celle du broyage des tiges dans les sucreries pour en extraire le jus.

Notons simplement que le défilage mécanique et l'action thermique qui en découle, conditionne l'état de surface des fibres et leur flexibilité. Il est souvent associé à des prétraitements et des traitements divers : prétraitement chimique ; imprégnation (eau, bisulfite de sodium, soude...), Chauffage...

L'IRD et l'INRA¹ développent des procédés biologiques (laccase de champignons) de production de pâte à papier à partir de bagasse comme alternative aux procédés traditionnels polluants de délignification et de blanchiment.

L'un des usages des enzymes dans les processus de délignification concerne les xylanases. Les hémicelluloses sont les plus sensibles aux hydrolyses. Les chaînes polymères du xylose qui en résultent se déposent et se lient aux lignines (complexe lignine-carbohydriques) en les protégeant des agents chimiques de blanchiment. L'action enzymatique permet une décomposition rapide des xylanases et une amélioration de la pâte à papier produite dont l'indice Kappa est inférieur à 30 (Gonçalves et al. 2005).

A notre connaissance, les procédés ne sont pas aujourd'hui industrialisés, ou ils font l'objet d'usage partielle pour améliorer le produit brute pendant la période de stockage.

524. Défilage chimique

Les procédés de défilage chimique produisent des pâtes chimiques. Il s'agit d'une cuisson de la fibre brute en présence de réactifs aptes à dissoudre et à éliminer au maximum les liants des fibres (pectines, protéines, hémicellulose, lignines). Le résultat doit être une fibre cellulosique la plus pure possible.

¹ UMR 180 (IRD), UMR 1163 (INRA) et IFR-BAIM (Biotechnologies agro-industrielles de Marseille)

Le procédé chimique le plus courant pour la bagasse de canne à sucre est le procédé Kraft. Les réactifs de base sont la soude¹, le sulfate de sodium et le sulfure de sodium². D'autres réactifs chimiques secondaires sont généralement ajoutés à la liqueur de cuisson (liqueur blanche) pour améliorer la dissolution des lignines ou mieux protéger les polysaccharides. Les températures et temps de cuissons sont aussi modulés. Le procédé est ainsi adapté à la qualité des fibres traitées. Les produits chimiques utilisés sont recyclés en fin de cuisson (liqueur noire). La silice se dépose dans les unités d'évaporation qui traitent les liqueurs noires pour récupérer les réactifs chimiques (Lam et al. 2005).

L'intérêt de la bagasse de canne à sucre pour la production de papier provient des besoins énergétiques plus faibles pour la fabrication de pâtes mais aussi de la périodicité de production et du rendement. Un hectare de canne à sucre va produire environ deux fois plus de pulpe que le bois. Le renouvellement de la production est par ailleurs 15 fois plus rapide (Almazan et al. 2001).

La pulpe de bagasse n'intervenait que partiellement et en mélange avec de la pulpe de bois pour la fabrication de papier il y a une dizaine d'année (10 à 15 %). Les progrès technologiques permettent aujourd'hui de faire du papier 100 % bagasse sans qu'il soit possible de le différencier du papier issue de ligneux.

La Louisiana State University a travaillé quelques années à un procédé d'extraction des fibres de bagasse de canne à sucre pour la fabrication de mat (*mat*) destiné à un usage géotextile (Thames et al. 1994). La bagasse est tamisée puis traitée avec une solution alcaline portée à ébullition (rapport volumétrique 1:20). La concentration alcaline et le temps de traitement sont liés à la qualité de la bagasse et au type de produit recherché. Ces paramètres jouent sur la quantité de lignine extraite. Elle définit la taille des groupes de fibres (Collier et al. 1992) et affecte les propriétés de flexibilité (*bending*) et de résistance (*tensil*) des fibres. Le résultat est ensuite lavé et séché. Cette méthode permet d'obtenir des fibres d'une longueur de 22,3 mm et un tex³ de 58,7 (Chen et al. 2004).

Les études conduites en Chine sur l'extraction de la cellulose de la bagasse de canne à sucre (Sun et al. 2004) montrent les rendements des différentes méthodes testées (Tableau 28) et donne une idée des besoins chimiques associés.

Tableau 28 : Extractions de la cellulose à partir de bagasse de canne à sucre « décirée »

Procédé d'extraction (délignification)	Rendement %		
	Cellulose	Hémicellulose	Lignines
Ultrason puis NaOH	44,7	6,0	3,4
Ultrason puis NaOH et H ₂ O ₂	45,9	7,2	3,9
NaCl acide puis KOH	44,7	5,7	1,6
NaCl acide puis NaOH	44,2	3,7	1,5
Acide acétique (70%) et acide nitrique (80%) 110°C 20'	43,0	3,2	0,2
Acide acétique (70%) et acide nitrique (80%) 120°C 20'	43,6	4,3	0,6

Aujla et al. (2008) montrent que les qualités mécaniques des pulpes de bagasse démoellées ou non sont supérieures à celles des pailles de blé, qu'il s'agisse de la rigidité (*stiffness*) de la résistance (*tensil index*) ou de la résistance à l'éclatement (*burst index*).

La délignification chimique trop poussée dégrade la cellulose. La cuisson est donc limitée dans le temps et on parfait la délignification par les étapes du blanchiment. Le blanchiment

¹ L'hydroxyde de sodium est utilisé de manière massive, avec un pH de départ de cuisson entre 13 et 14.

² Les pâtes obtenues par le procédé Kraft sont qualifiées de pâtes au sulfate.

³ Le tex est la mesure du poids en gramme de 1000m de fibre.

n'est pas abordé dans cette note. Il s'agit d'une délignification très consommatrice en réactifs chimiques coûteux et polluants.

Venter et Klashorst, (1989) énumèrent quelques usages des lignines résiduelles des procédés de production de pâte chimique et de blanchiment. La vanilline constitue un produit marginal du fait de la faible demande mondiale. L'hydrocracking et l'hydroalkylation permettent d'obtenir un mélange de 20 % de phénols, 13 % de carburant, 29 % de gaz et 14 % de benzène. L'utilisation de la lignine sous sa forme polymérisée, sans dégradation permet de produire des stabilisants d'émulsion ou de mousse (*foam*) d'extincteurs, des agents de répartition des colorants (*dye leveller*), des briquettes binder, des additifs pour pesticides ou résines échangeuses d'ions, des produits d'extension pour l'industrie du caoutchouc (*extender*), des stabilisants pour sol, des dispersants pour l'industrie des forages pétroliers...

Il existe de nombreux brevets pour utiliser les lignines comme adhésifs (bois, papier) mais leur commercialisation se heurte à une faible réactivité. Les lignines de bagasse issues des liqueurs noires de procédés à la soude (*soda bagasse liquor*) sont par contre très réactives et conviennent mieux que d'autres lignines à la fabrication d'adhésifs (**Ch.III-§4**).

Les procédés papetiers industriels doivent impérativement récupérer les réactifs chimiques notamment pour des raisons économiques. Dans les procédés Kraft ou à la soude (*Soda*) les liqueurs noires doivent être brûlées pour récupérer les minéraux employés.

Le procédé organosolve¹ (*organosolv*) utilise des solvants organiques² pour casser les liens structuraux entre les hémicelluloses et les lignines. Les solvants sont récupérés par distillation et les lignines sont ainsi isolées.

Dans le procédé solvant organique CO₂ supercritique (*organosolv-CO₂ supercritical pulping process*), l'utilisation du CO₂ liquide pressurisé permet de limiter de moitié les solvants organiques et facilite la récupération des lignines par dépressurisation post « pulpage ». Ce procédé produit des pâtes moins résistantes (*strength*) mais plus rapidement et avec le même rendement (Pereira et al. 2007).

A titre d'exemple, un procédé organosolve à l'éthanol, optimisé pour la paille de *Miscanthus giganteus* permet de récupérer 98 % des glucanes (essentiellement cellulose) sous forme de résidu solide, 71 % des lignines et 78 % du xylose présent sous forme initiale d'hémicellulose (Brosse et al. 2009).

Les lignines de bagasse de canne à sucre peuvent être employées dans la fabrication de nano-films à forte valeur ajoutée (Constantino et al. 2000). Ces nano-films LB³ sont caractérisés par une orientation des noyaux aromatiques parallèlement au substrat.

525. Défilage par explosion à la vapeur

L'explosion à la vapeur (*steam explosion*) est un procédé de courte cuisson à la vapeur (1 à 2 minutes) de la fibre à une température comprise entre 180 et 210-250° C. Elle est suivie d'une décompression explosive (Kokta et Ahmed, 1998) correspondant à un passage brutal de 7 à 1 atmosphère.

¹ Les procédés organosolve diffèrent en fait des procédés chimiques. Ils sont bâtis autour de principes de bioraffinage et non pas de production de fibre ? La composante environnementale est en outre beaucoup plus présente.

² Méthanol, éthanol, acétone, éthylène glycol... adaptés au substrat et au produit fini recherché.

³ Films Langmuir-Blodgett (LB). L'affinité des lignines pour les métaux lourds font des films LB-lignine des capteurs (transducer) pour détecteurs de pollution dans les eaux (sensing device).

La technique a été mise au point pour les feuillus (*hardwood*). Elle s'avère très intéressante pour les conifères (*softwood*) et les plantes herbacées, car elle libère la cellulose. L'explosion à la vapeur libère aussi des molécules inhibitrices des enzymes permettant d'hydrolyser la cellulose et de faire fermenter les hydrolysats pour produire de l'éthanol (Palmqvist et al. 1996 ; Martin et al. 2002).

Ce procédé de défilage dégrade moins les hémicelluloses, dont les parties résiduelles sont extractibles par l'eau chaude. Les lignines sont dépolymérisées (liaisons éther détruites).

Un autre procédé, l'oxydation humide, consiste à prétraiter la lignocellulose avec de l'eau et de l'air ou de l'oxygène à une température inférieure à 120° C en présence de substances chimiques alcalines. Ce procédé a été testé sur bagasse de canne à sucre (Martin et al. 2007) en présence de Na₂CO₃. Comparé à l'explosion à la vapeur (Tableau 29), il conduit à une phase solide où se retrouve 93 % de la cellulose, 18% des hémicelluloses et 49 % des lignines pour respectivement 81, 40 et 65 %. La solubilisation des hémicelluloses et des lignines est donc meilleure tandis que la cellulose est presque totalement récupérée.

Tableau 29 : Bilan des deux techniques exprimé en composé solide résiduel principal

Composants		Bagasse*	Après oxydation humide	Après explosion à la vapeur
Bilan matière		100	52,9	61,5
Cellulose		34,3	60,5	45,0
Hémicellulose		22	7,3	14,3
dont	Xylane	19,9	6,9	12,9
	Arabinane	2,1	0,4	1,4
Lignines (Klason)		21,8	20,4	23,1
Cendres		1,4	0,4	0,8

* Bagasse broyée, tamisée à 2mm et conservée à l'obscurité

On retrouve dans la phase liquide, en dehors des dérivés des sucres plus ou moins dépolymérisés, des co-produits chimiques intéressants (Tableau 30). L'explosion à la vapeur permet une production importante d'aldéhyde de furanne et une faible production d'acides aliphatiques. L'oxydation humide inverse ces proportions (Martin et al. 2008).

Tableau 30 : co-produits chimiques de la phase solide en g pour 100g de bagasse brute

Composés	Oxydation humide	Explosion à la vapeur
Acide succinique	0,2	0
Acide glycolique	1,2	0,1
Acide formique	2,1	0,4
Acide acétique	3,2	1,7
Total acides aliphatiques	6.7	2.4
Composés phénoliques	2,7	2,1
Furfural	0,2	0,6
Hydroxyméthylfurfural	0	0,2

Les composés phénoliques ainsi que le furfural et l'hydroxyméthylfurfural¹ sont des inhibiteurs des microorganismes conduisant à l'éthanol. Les résultats confirmés par des expérimentations antécédentes (Martin et al. 2006 ; Martin et al. 2007) sont largement en faveur de l'oxydation humide pour une filière éthanol de seconde génération. La

¹ A titre d'exemple 'chimie verte', la sucrerie **Central Romana** de Saint Domingue produit de l'hydrométhylfurfural très utilisés dans l'industrie chimique, la pétrochimie et la plasturgie, à partir de la bagasse depuis des décennies. Le furfural est un composé cyclique en C5 qui dérive directement des hémicelluloses présentes dans la bagasse. L'Afrique du Sud produit également du furfural à partir de bagasse de canne à sucre.

concentration relativement faible de ces acides et composés chimiques dans les solutions issues des deux procédés thermochimiques pose des problèmes économiques d'extraction et fait l'objet de recherches.

Notons pour le volet chimie verte que des acides organiques qualifiables de synthons sont très faciles à produire à partir de la bagasse de canne à sucre ([Blinco et Doherty, 2005](#)), par voie chimique (acide aconitique) ou par fermentation, de manière rentable (acétique, lactique) ou pouvant le devenir au terme de l'amélioration des procédés et de l'évolution des prix (succinique, lévulinique, citrique..). Nombre de ces acides ont des usages alimentaires. Rappelons enfin que les sucres, qui ne sont pas abordés dans cette note, sont aussi des précurseurs d'une industrie chimique prolifique pas uniquement alimentaire.

REFERENCES

- Abdulrazzak, N.; Pollet, B.; Ehling, J.; Larsen, K.; Asnaghi, C.; Ronseau, S.; Proux, C.; Erhardt, M.; Seltzer, D.; Renou, J-P.; Pauli, M.; Lapierre, C.; and Wreck-Reichhart, D., 2006. A coumaroyl-ester-3-hydroxylase insertion mutant reveals the existence of nonredundant meta-hydroxylation pathways and essential role for phenolic precursors in cell expansion and plant growth. *Plant Physiology*. 140 : 30-48.
- Adani, F.; Spagnol, M.; Nierop; and K.G.J., 2007. Biochemical origin and refractory properties of humic acid extracted from maize plants: contribution of lignin. *Biochemistry*. 82 (1) : 55-65.
- Agblevor, F.A.; Rejai, B.; Wang, D.; Wiselogle, A. and Chum, H.L., 1994. Influence of storage conditions on the production of hydrocarbons from herbaceous biomass. *Biomass and Bioenergy*. 7 (1-6) : 213-222.
- Al-Arni, S.; Zilli, M. and Converti, A., 2007. Solubilization of lignin components of food concern from sugarcane bagasse by alkaline hydrolysis. *Ciencia y Tecnologia Alimentaria*. 5 (4) : 271-277.
- Albert-Thenet, J. R.; and Rao, P., S., 2005. Fuel cane for the production of electricity in Barbados. WISBEN meeting, Barbados, 8 p.
- Alexander, A.G., 1973. Sugarcane Physiology. Elsevier, Amsterdam.
- Alexander, A. G., 1979. Production of sugarcane and tropical grasses as a renewable energy source. First and second quarterly reports to the DOE, Fuels from Biomass Systems Branch. Year 3, 1979-1980.
- Alexander, A. G. 1985. The energy cane alternative. Sugar series, 6. Elsevier Science Publisher, B.V. 510 p.
- Alexander, A.G., 1986. Sugarcane as source of biomass. In : FAO Animal Production and Health Papers. ISBN :9251029695. 13 p.
- Alix, K.; Paulet, F.; Glaszmann, J.-C. and D'Hont, A., 1999. Inter-Alu-like species-specific sequences in the Saccharum complex. *Theoretical and Applied Genetics*. 99 (6) : 962-968.
- Allison J.C.S. and Pammenter N.W., 2005. Why does sugarcane grow slowly? Proceedings of the 78th Annual Congress of South African Sugar Technologists' Association, held at Kwa Shukela, Mount Edgecombe, South Africa, 27-30 July 2004 : 119-121.
- Almazan O. Gonzalez L.; and Galvez L., 2001. The sugarcane. Its by-products and co-products. *Sugar Cane International*. 7 : 3-8.
- Alvarez, S. ; Marsh, E.L. ; Schroeder, S.G. and Schachtman, D.P., 2008. Metabolic and proteomic changes in the xylem sap of maize under drought. *Plant, Cell and Environment*. 31 (3) :325-340.
- Anderson, W.F. and Akin, D.E., 2008. Structural and chemical properties of grass lignocelluloses related to conversion for biofuels. *Journal of Industrial Microbiology & Technology*. 35 (5) : 355-366.
- Andrade, J.B. ; Junior, E.F. ; Possenti, R.A. ; Otsuk, I.P. ; Zimback, L. and Landell, M.G.A., 2003. Seleccion de 39 variedades de cana de azucar para a alimentacao animal. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*. 40 : 287-296.
- Andreux, F., 1979. Génèse et propriétés des molécules humiques. In Pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol. Bonneau M and Souchier B. Ed. Masson. Chapitre VI : 97-122.
- Anterola, A. M. ; and Lewis, N. G., 2002. Trends in lignin modification: a comprehensive analysis of

- the effects of genetic manipulations/mutations on lignification and vascular integrity. *Phytochemistry*. 61 : 221-294.
- Arbex, M.A.; Böhm, G.M.; Saldiva, P.H.N.; Conceicao G.M.S.; Pope, A.C.; and Braga, L.F., 2000. Assessment of the effects of sugar cane plantation burning on daily counts of inhalation therapy. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 50 (10) : 1745-1749.
- Arencibia, A.D.; Bernal, A.; Yang, L.; Cortegaza, L.; Carmona, E.R.; Pérez, A.; Hu, C-J.; Li, Y-R.; Zayas, C. M.; and Santana, I., 2008. New role of phenylpropanoid compounds during sugarcane micropropagation in temporary immersion bioreactors (TIBs). *Plant Science*. 175 : 467-496.
- Ashori, A.; and Nourbakhsh, A., 2009. Polypropylen cellulose based composites : The effect of bagasse reinforcement and polybutadiene isocyanate treatment on the mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 111 (4) 2 : 1684-1689.
- Atchison, J.E., 1993. Bagasse. In : Paper, Paper Manufacture. Secondary fibres. Non-wood pulping. Eds Hamilton F ; Leopold B. Tappi Press, Atlanta. 3 : 22-70.
- Atchison, J.E., 1993. Making the right choices for successful bagasse newsprint production : Part 2. *Tappi Journal*. 76 (1) : 187-193.
- Aujla, M.I.; Kashmiri, M.A.; Ali, B.; Hussain, M.; Adman, A.; and Qureshi, M.Z., 2008. A comparison between wheat straw and whole and dehtithed bagasse pulp obtained by chemi-thermo-mecanical pulping process. Proceedings of the International Conference of Pulping and Papermaking Biotechnology. 1 : 428-433.
- Bacic, A.; Harris, P.J.; and Stone, B.A., 1988. Structure and function of plant cell walls. *The biochemistry of Plants : A comprehensive Treatise*. Ed. Preiss J. 14 : 297-371.
- Bakri, A.M.M. -Al; Ruzaidi, G.C.M.; Norazian, M.N.; and Liyana, J., 2008. Properties of polymer composite with sugarcane bagasse filler. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT). Waste management (industrial domestic natural) :167-172.
- Barrière, Y.; Thomas, J.; and Denoue, D., 2008. QTL mapping for lignin content. Lignin monomeric composition, p-hydroxycinnamate content, and cell wall digestibility in the maize recombinant inbred line progeny F838xF286. *Plant Science*. 175 (4) : 585-595.
- Barrière Y.; Alber, D.; Dolstra, O.; Lapierre, C.; Motto, M.; Ordas, A.; Waes, J. Van; Vlaswinkel, L.; Welker, C.; and Monod, J.P., 2005. Past and prospects of forage maize breeding in Europe. I. The grass cell wall as a basis of genetic variation and future improvements in feeding value. *Maydica*. 50 (3-4) : 259-274.
- Barrière, Y.; Guillet, C.; Goffner, D.; and Pichon, M., 2003. Genetic variation and breeding strategies for improved cell-wall digestibility in annual forage crops. A review. *Animal Research*. 52 :193-228.
- Batista de Aquino, F.W.; Rodrigues S.; Ferreira do Nascimento, R.; and Casimiro, A.R.S., 2006. Simultaneous determination of aging markers in sugar cane spirits. *Food Chemistry*. 98 : 569-574.
- Baucher, M.; Monties, B.; Montagu Van, M.; and Boerjan, W., 1998. Biosynthesis and genetic engineering of lignin. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 17 : 125-197.
- Bhattacharya, D.; Germinario, L.T.; and Winter, W.T., 2008. Isolation, preparation and characterization of cellulose microfibrils obtained from bagasse. *Carbohydrat Polymers*. Ed. Elsevier. 73 (3) : 371-377.
- Berding, N.; Pendrigh, R. S.; and Dunne, V., 2008. Can flowering in sugarcane be optimised by use of differential declinations for the initiation and development phases? XXVI Congress, International Society of Sugar Cane Technologists, ICC, Durban, South Africa, 29 July - 2 August, 2007. 26 : 699-711.
- Berding, N.; and Hurney, A. P., 2005. Flowering and lodging, physiological-based traits affecting cane and sugar yield. What do we know of their control mechanisms and how do we manage them ? Ed. Inman-Bamber, N. G. ; Bonnett, G. D. ; Thorburn, P. J. and Smith, D. M. *Field Crops Research*. 92 (2/3) : 261-275.

- Berding, N.; Hurney, A.P.; Salter, B.; and Bonnett, G.D., 2005. Agronomic impact of sucker development in sugarcane under different environmental conditions. *Field Crop Research*. 92 : 203-217.
- Berding, N.; and Moore, P.J., 2001. Advancing from oportunist sexual recombination in sugarcane. Lessons from tropical photoperiodic research. *Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists*. 24 : 482-487.
- Berding, N., 1995. Improving flowering of sugarcane for breeding : Progress and prospects. *Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists*. 162-171.
- Berding, N.; and Roach, B.T., 1987. Germplasm collection maintenance and use. In : Heinz, D.J. Ed. *Sugarcane Improvement Through Breeding*. Elsevier, Amsterdam. 143-210
- Bernhardt, W., 1998. Handling properties of sugarcane bagasse. I. characterization of bagasse particles. *Sukerindustrie*. 123 (6) : 428-432.
- Bernhardt, W., 1999. Handling properties of sugarcane bagasse. Part III. The phenomenon of bridging. *Sukerindustrie*. 124 (6) : 456-461.
- Berio-Sierra, J., 2007. Etude biochimique et immunocytolochemie de l'impact de mutations génétiques sur la lignification et l'assemblage des parois d'*Arabidopsis thaliana*. Thèse de doctorat en chimie biologique. Université Joseph Fourier Grenoble 1. 197 p.
- Berthelsen, S; Hurney, A.; Noble, A.; Rudd, A.; Garside, A.; and Henderson A., 2001. An assessment of current silicon status of sugarcane production soils from Tully to Mossman. *Proceedings of the Australian Sugar Cane Technologists*. 289-296.
- Besle, J.-M. ; Cornu, A. ; and Jouany, J.-P., 1994. Roles of structural phenylpropanoids in forage cell wall digestion. *Journal of the science of food and agriculture*. 64 (2) : 171-190.
- Bhuiyan, N.H.; Selvaraj, G.; and YangDou, W., 2009. Gene expression profiling and silencing reveals that monolignols biosynthesis plays a critical role in penetration defence in wheat against powdery mildew invasion. *Journal of Experimental Botany*. 60 (2) : 509-521.
- Biemelt, S.; Tschiersch, H.; and Sonnewald, U, 2004. Impact of altered gibberelline metabolism on biomass accumulation, lignin biosynthesis and photosynthesis in tobacco plants. *Plant Physiology*. 135 : 1-12.
- Blechsmidt-Schneider, S.; Ferrar, P.; and Osmond, C.B., 1989. Control of photosynthesis by carbohydrate level in leaves of the C4 plant *Amaranthus edulis* L. *Planta*. 177 : 515-525.
- Blinco, J.A.L.; and Doherty, W.O.S., 2005. Review on extraction technologies for organic acid production. *Proceedings of the 2005 conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*. 480-488.
- Boussarsar, H.; Rogé, B.; and Mathlouthi, M., 2009. Optimization of bagasse conversion by hydrothermal treatment for the recovery of xylose. *Bioresource Technology*. 100 : 6537-6542.
- Breccia, J.L.; Bettucci, L.; Piaggio, L.; and Siñeriz, F., 1997. Degradation of sugar cane bagasse by several white-rot fungi. *Acta Biotechnologica*. 17 (2) : 177-184.
- Brett, P.G.C.; and Harding R.L., 1974. Artificial induction of flowering in Natal. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*. 15 : 55-56.
- Briceño, C.O.; Cock, J.H.; and Torres, J.S., 2001. Electric power from green harvesting residues of sugar cane in Columbia. *Sugar Cane International*, March 2001 : 15-19.
- Briceño C.O. and Torres J.S., 2001. Changes in green cane harvest residues during storage. *Proceedings of the International Society of the Sugar Cane technologists*. Brisbane, Sept 2001. 24 : 197-202.
- Bridgeman, T.G.; Darvell, L.I.; Jones, J.M.; Williams, P.T.; Fahmi, R.; Bridgwater, A.V.; Barraclough, T.; Shield, I.; Bates, N.; Thain, S.C.; and Donnison, I.S., 2007. Influence of particle size on the analytical and chemical properties of two energy crops. *Fuel*. 86 : 60-72.

- Brosse, N.; Sannigrahi, P.; and Ragauskas, A., 2009. Pretreatment of *Miscanthus x giganteus* using ethanol organosolv process for ethanol production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 48 (18) : 8328-8334.
- Brown, A.H.D.; Daniels, J.; and Latter, B.D.H., 1969. Quantitative genetics of sugarcane. II. Correlation analysis of continuous characters in relation to hybrid sugarcane breeding. *Theoretical and Applied Genetics*. 39 :1-10.
- Brumbley, S.M.; Purnell, M.P.; and Petrasovits, L.A., 2007. Developing the sugarcane biofactory for high-value biomaterials. *International Sugar Journal*. 109 (1297) : 5-15.
- Bryant B.S., 1978. Corrugated roofing panels from agricultural residues. *Appropriate Technology*. 4 (4) : 26-28.
- Buchanan, B. B.; Gruissem, W.; and Jones, R. L., March 2002. Biochemistry & molecular biology of plants. Ed. Buchanan B. B., Gruissem W., Jones R. L. American Society of Plant Physiologists. Jones Wiley, ISBN 0943088399. 1408 pp.
- Buranow, A.U.; and Mazza, G., 2009. Extraction and purification of ferulic acid from flax shives, wheat and corn bran by alkaline hydrolysis and pressurised solvents. *Food Chemistry*. 115 (4) : 1542-1548.
- Burner, D.M.; Tew, T.L.; Harvey, J.J.; and Belesky, D.P., 2009. Dry matter partitioning and quality of *Miscanthus*, *Panicum* and *Saccharum* genotypes in Arkansas, USA. *Biomass and Bioenergy*. 33 : 610-619.
- Cabané, M. ; Pireaux, J.C. ; Léger E. ; Weber E. ; Dizengremel P. ; Pollet B. ; and Lapierre C. 2004. Condensed lignins are synthesized in poplar leaves exposed to ozone. *Plant Physiology*. 134 : 1-9.
- Cai, Q. ; Aitken, K. ; Deng, H.H. ; Chen, X.W. ; Fu, C. ; Jackson, P.A. ; and McIntyre, C.L., 2005. Verification of the introgression of *Erianthus arundinaceus* germplasm into sugarcane using molecular markers. *Plant Breeding*. 124 : 322-328.
- Cao, Y. ; Shibata, S. ; and Fukumoto, I., 2006. Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. *Composites Part A : applied science and manufacturing*. 37 : 423-429.
- Carels, N., 2000. Organisation et évolution du génome des Angiospermes. Thèse de doctorat . Université Paris VI. Paris 14 décembre 1999. ISBN 1-58112-112-1. 159 p. et annexes.
- Carré, J ; Hébert J ; Lacrosse, L ; and Schenkel, Y. 1991. Le chauffage au bois. Note technique n° 48. Centre de Recherche Agronomique de Gembloux.
- Catesson, A.M., 1980. Les tissus végétaux. Ultrastructure biogénèse. In : Les Polymères Végétaux. Polymères Pariétaux et alimentaires non azoté. Vol 2, Part I. Ed. Monties B. Bordas - Gauthier-Villars.1-29.
- Chabbert, B. ; Loly, C. ; and Kurek, B., 2006. Fibres végétales – Retour vers le futur. In La chimie verte. Ed. Tec & Doc, Lavoisier. Juin 2006. ISBN 10 : 2-7430-0834-2. Chapitre 5 : 99-144.
- Chandel, A.K. ; Narasu, M.L. ; Chandrasekhar G.; Manikyam A. ; and Rao L.V., 2009. Use of *Saccharum spontaneum* (wild sugarcane) as biomaterial for cell immobilization and modulated ethanol production by thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* VS3. *Bioresource Technology*. 100 : 2404 - 2410.
- Chang, Y.S.; and Huang, K.M., 1980. Effect of endogenous C/N ratio and gibberellin-like substance on floral initiation in sugar cane. Rep. Taiwan Sugar Research Institute. 90 : 1-8.
- Chang, H.M.; and Sarkamen, K.V., 1973. Species variations in lignin effect of species on the rate of Kraft delignification. TAPPI. 56. 132-136.
- Chawla, K. K., 1998. Fibrous material. New York Cambridge University. 293 p.
- Cheesman, O.D., 2005. Environmental impacts of sugar production. The cultivation and processing of

- sugarcane and sugarbeet. In: Uses and impacts of by-products Edt : Cheesman OD; Wallingford, UK. Chapter 8 : 151-172.
- Chen, Y.; Chiparus, O.; Negulescu, I.; Parikh, D.V.; and Calamari T.A., 2004. Waste bagasse for production of nonwoven composites. *Intenational Sugar Journal*. 106 : 86-92.
- Chiparus, O.I.; and Chen, Y., 2003. An image method to evaluate bagasse fiber dimensions. *Bioresource Technology*. Ed. Elsevier. 90 : 305-309.
- Christoffoleti, JP ; Carvalho, SJP ; Lopez-Ovejero, RF ; Nicolai, M ; Hidalgo, E; and Da Silva, JE., 2007. Conservation of natural resources in Brazilian agriculture: Implications on weed biology and management. *Crop Protection*. 26 : 283-389.
- Cinelli, P.; Chiellini, E.; and Imam, S.H., 2008. Hybrid composite based on polyvynil alcoolol and fillers from renewable resources. *Journal of Applied Polymer Science*. 109 (3) 8 : 1684-1691.
- Clarke, S. J.; and Giamalva, M. J., 1986. Material and energy balance for processing high fiber sugarcane. *Biomass Energy Development* : 607-620.
- Clarke, S.J.; and Keenlside, W., 1986. Cane varieties for power production. Proc Inter-American Sugar Cane Seminar :102-115.
- Clements, H.F., 1980. Sugarcane crop jogging and crop control: Principles and practices. The Pitman International Series in Applied Biology. 520 p.
- Clements, H.F., 1975. Flowering to sugarcane: Mechanisms and control. Hawaiïan Agriculture Experimental Station Technical Bulletin. 92 : 56 p.
- Coleman R.E., 1963. Effect of temperature on flowering of sugar cane. *International Sugar Journal*. 65 : 351-353.
- Collier, B.J.; and Arora, M.S., 1994. Water pretreatment and alkaline treatment for extraction of fibers from sugarcane rind. *Clothing and Textiles Research journal*. 14 : 1-6.
- Collier, B.J.; Collier, J.R.; Agarwal, P. and Lu, Y.W., 1992. Extraction and evaluation of fibers from sugarcane. *Textile Research Journal*. 62 (12) : 741-748.
- Colombo, R.; Yariwake, J.H.; Quieroz, E.F.; Ndjoko, K.; and Hostettmann, K., 2006. On-line identification of further flavone C- and O-glycosides from sugarcane (*Saccharum officinarum* L., *Granimaea*) by HPLC-UV-MS. *Phytochemical Analysis*. 17 : 337-343.
- Colonna, P., 2006. La chimie verte. Ed. Tec & Doc, Lavoisier. ISBN 10 : 2-7430-0834-2. 532 p.
- Conçalves, A.R.; Costa, S.M.; and Esposito, E., 2002. *Panus tigrinus* strains used in delignification of sugarcane bagasse prior to Kraft pulping. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 98-100 : 373-382.
- Constantino, C.J.L. ; Dhanabalan, A. ; Cotta, M.A. ; Pereira-da-silva, M.A. ; Curvelo, A.A.S.; and Oliviera, O.N. jr, 2000. Atomic force microscopy (AFM) investigation of Langmuir-Blodgett (LB) films of sugarcane lignin. *Holzforschung*. 54 (1) : 55-40.
- Cook, D.J. ; Pama, R.P.; and Weerasingle, H.L.S.D., 1978. Coir fibre reinforced cement as a low cost roofing material. *Building and Environment*. 13 (3) : 193-198.
- Costa, S.M.; Gonçalves, A.R.; and Esposite, E., 2002. Action of White-Rot Fungus *Panus tigrinus* on Sugarcane Bagasse. Evaluation of Selectivity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 98-100 : 357-364.
- Dangles, O., SD. Présentation Générale des Métabolites Secondaires ou Produits Naturels. UMR A 408 INRA – Université d’Avignon, Equipe des Antioxydants. Présentation power point. 55 diapo.
- Dangyang, K.E.; Mikal, E.; and Saltveit, Jr., 1989. Wound-induced ethylene production, phenolic metabolism and susceptibility to russet spotting in iceberg lettuce. *Physiologia Plantarum*. 76 (3) : 412-418.

- Davis, B.L.; and Philipps, M., 1941. The hemicellulose of sugarcane fiber (bagasse). *Journal of Agricultural Research*. 63 (4) : 241-247.
- DeBoer H, 2007. High fibre cane update. Sugar Breeding Workshop;. Guyana, 22 au 26 October 2007. Power-point, 24 slides.
- Dekkers, B.J.; Schuurmans, J.A.; and Smeekens, S.C., 2004. Glucose delays seed germination in *Arabidopsis thaliana*. *Planta*. 218 : 579-588.
- Deren, C.W.; Glaz B.; and Snyder G.H., 1993. Leaf-tissue silicon content of sugarcane geno-types grown on Everglades histosols. *Journal of plant Nutrition*. 16 (11) : 2273-2280.
- D'Hont, A.; Rao, P.S.; Feldmann, P.; Grivet, L.; Islam-Faridi, N; Taylor, P.; and Glaszmann, J.C., 1995. Identification and characterisation of sugarcane intergeneric hybrids, *Saccharum officinarum* x *Erianthus arundinaceus*, with molecular markers and DNA in situ hybridisation. *Theoretical and Applied Genetics*. 91 (2) : 320-326.
- D'Hont, A. ; Grivet, L. ; Feldman, P. ; Rao, S. ; Berding, N. ; and Glaszmann, 1996. Characterization of the double genome structure of modern sugarcane cultivars (*Saccharum* spp.) by molecular cytogenetics. *Molecular and General Genetics*. 250 : 405-413
- D'Hont, A. ; Ison, D. ; Alix, K. ; Roux, C. ; and Glaszmann, J-C. 1998. Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccharum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. *Genome*. 41 : 221-225.
- Dinant, S., 2008. Phloème, transport interorgane et signalisation à longue distance. *Comptes Rendus Biologies*. 331 : 334-346.
- Doherty, W.; Halley, P.; Edye, L.; Rogers, D.; Cardona, F.; Park, Y. and Woo, T., 2007. Studies on polymers and composites from lignin and fiber derived from sugar cane. *Polymers for Advanced Technologies*. 18 : 673-678.
- Doran, J.B.; Aldrich, H.C.; and Ingram, L.O., 1994. Saccharification and fermentation of sugarcane bagasse. *Biotechnology and Bioengineering*. 44 : 240-247.
- Du, Y.-C.; Nose, A.; and Wasano, K., 1999. Effects of chilling temperature on photosynthetic rates, photosynthetic enzyme activities and metabolite levels in leaves of three sugarcane species. *Plant, Cell & Environment*. 22 : 317-324.
- Duarte-Almeida, J.M.; Novoa, A.V.; Linares, A.F.; Lajolo, F.M.; and Genovese, M.I., 2006. Antioxydant activity of phenolics compounds from sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) juice. *Plant Foods for Human Nutrition*. 61 : 187-192.
- Du Toit, P.J.; and Van Bijon, P.L., 1984. Sugar cane bagasse a possible source of fermentable carbohydrates. I. Caractérisation de bagasse with regard to monosaccharide, hemicellulose and amino acid composition. *Biotechnology & Bioengineering*. Ed. Wang D.I.C. 26 (9) : 1071-1078.
- Ellis, S.; and Paszner, L., 1994. Activated self-bonding of wood and agricultural residues. *Holzforschung*. 48 : 82-90.
- El-Sakhawy, M.; and Hassan, M.L., 2007. Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues. *Carbohydrate Polymers*. 67 : 1-10.
- Elsunni, M.M.; and Collier, J.R., 1996. Processing of sugarcane rind into nonwoven fibres. *Journal of American Society of Sugarcane Technologists*. 16 : 94-110.
- Escandell Urquijo, D.; and Rubio Gonzalez, A., 1998. Compressibility of sugarcane straw. *Centro Azucar*. 25 (1) : 88-92.
- Eriksson, M.E.; Israelsson, M.; Olsson, O.; and Moritz, T., 2000. Increased gibberellin biosynthesis in transgenic tree promotes growth, biomass production and xylem fiber length. *Nature Biotechnology*. 18 : 784-788.

- Feng, X. ; RunCang, S. ; JinXia, S. ; ChuanFu L. ; BeiHai, H. ; and JinShan F., 2005. Determination of cell wall ferulic and p-coumaric acids in sugarcane bagasse. *Analytica Chimica Acta*. 552 (1-2) : 207-217.
- Ferreira, G.D.G.; Barrière, I.; Emile, J.C.; Jobim, C.C. and Lefevre, B., 2005. Nutritional value of corn plant (*Zea mays* L.) without ears. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*. 27 : 4, 433-438.
- Folks M.J., 1982. Short fiber reinforced thermoplastics. UK Wiley.
- Fontaine A-S, 2002. Recherche de déterminants génétiques et moléculaires impliqués dans la digestibilité des parois du maïs fourrage. Thèse de doctorat. Université de Poitiers. Ecole doctorale Ingénierie chimique biologique et géologique.
- Ford, C.W.; and Harley, R.D., 1990. Cyclodimers of p-coumaric and ferulic acids in the cell walls of tropical grasses. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 50 : 29-43.
- Foreman, J.; Jackson, P.; Aitken, K.; Li, J.; Liping, W.; Cheng, F.; Yuanhong, F.; Haihua, D.; Fengduo, H.; and Croft, B., 2007. Introduction and evaluation of clones derived from Chinese *Saccharum spontaneum* and *Erianthus* spp. *Sugar Cane International*. 25 (5) : 3-7, 12.
- Francini-Presenti, F.; Brocadello, F.; Beltramoli, D.; Mardi, M.; and Caregaro, L., 2008. Sugar cane policosanols failed to lower plasma cholesterol in primitive, diet-resistant hypercholesterolaemia : A double blind ; controlled study. *Complementary Therapies in Medicine*. 16 : 61-65.
- Frank, N.; Vaast, P.; Génard, M.; and Dauzat, J., 2006. Soluble sugars mediate sink feedback down-regulation of leaf photosynthesis in field-grown *Coffea arabica*. *Tree Physiology*. 26 : 517-525.
- Frollini, E; Piccolo, R.S.J.; Cerne, J.L.; and Groote, R.A.M.C. - de, 1994. Acetosolv sugar-cane-bagasse lignin in the synthesis of phenolic type resins. Ed. Marcel Dekker Inc. *Macromolecular Reports*. 31 (6-7) : 1215-1223.
- Gassan, J.; and Bledzki, A.K., 1999 . Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibers. *Composites Science and technology*. 59 (9) : 1303-1309.
- Geoffroy, F. ; and Vivier, M., 1975. Intérêt des amarres de canne à sucre comme source de fourrage. *Nouvelles Agronomiques Antilles Guyane*. 1 : 46-55.
- Gerald, W.J. ; and Rodriguez-kabana, R., 1992. Method for the treatment of nematodes in soil using furfural. United States Great Lakes Chemical Corporation. US Patent 5084477.
- Giertz, H.W., 1963. La fabrication de la pâte et du papier. Unasylva Ed. FAO Rome. 69 (17) : 18 p.
- Gion J-M. 2000. La cartographie des gènes candidates chez l'Eucalyptus. Note scientifique. *Bois et Forêts des Tropiques*. 266 : 61-65.
- Godshall, M. A., 2005. Enhancing the agro-industrial value of the cellulosic residues of sugarcane. *International Sugar Journal*, 107 (1273) : 53-60.
- Gonçalves, A.R. ; Ruzene, D.S. ; Moriya, R.Y. ; and Oliveira, L.R.M., 2005. Pulping of sugarcane bagasse and straw and bioleaching of the pulps : conditions parameters and recycling of enzymes. 59th Appita Conference, Auckland, New Zealand: 16-19 May 2005. 14 p.
- Gonçalves, A.R.; Benar, P.; Costa, S.M.; Ruzene, D.S.; Moriya, R.Y.; Luz, S.M.; and Ferretti L.P., 2005. Integrated processes for use of pulps and lignins obtained from sugarcane bagasse and straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 121-124 : 821-826.
- Gooding, E.G.B., 1982. Effect of quality of cane on its value as livestock feed. *Tropical Animal Production*. 7 (2) : 71-91.
- Gosnell, J.M., 1973. Some factors affecting flowering in sugarcane. Proceedings of South African Sugar Technologists Association. 47 : 144-147.
- Goring, D.A.I., 1977. A speculative picture of the delignification process. ASC Symposium Series. Oxford University Press. 298 : 273-277.

- Graber, J.H.; Ralph, J.; Lapierre, C.; and Barrière, Y., 2004. Genetic and molecular basis of cell-wall degradability. I. Lignin-cell wall matrix interactions. *Comptes Rendus Biologies*. 337 : 455-465.
- Greef, J.M.; and Deuter, M., 1993. Syntaxonomy of *Miscanthus x giganteus*. *Angewandte Botanik*. 67 (3-4) : 87-90.
- Gressel, J. 2008. Transgenics are imperative for biofuel crops. *Plant Science* 174 : 246-263.
- Groote, R. A. M. C. de ; Curvelo, A. A. S. ; Frangiosa, P. C. and Zambon, M. D., 1992. Some properties of acetosolv sugar cane bagasse lignin. *Cellulose Chemistry and Technology*. 26 (1) : 53-61.
- Ha, S.; Moore, P.H.; Heinz, D.; Kato, S.; Ohmido, N, and Fukui, K., 1999. Quantitative chromosome map of the polyploid *Saccharum spontaneum* by multicolor fluorescence in situ hybridization and imaging methods. *Plant Molecular Biology*. 39 (6) : 1165-1173.
- Hamelinck, C.N.; Hooijdonk, van G.; and Faaji, A.P.C., 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long term. *Biomass Bioenergy*. 28 : 384-410.
- Harada, C. ; Saito, Y. ; Nakamura, Y. ; Minato, H., 2001. The effect of sodium hydroxide treatment on rice straw on in situ disappearance of hemicellulose and lignin in its cell wall. *Animal Science Journal* Ed. Japanese Society of Animal Science. 72 (1) : 19-25.
- Hassuani, S.L.; Silva J.E.A.R. – D; and Neves, J.L.M., 2005. Sugarcane trash recovery alternatives for power generation. *Zuckerindustrie*. 130 (10) : 781-786.
- Hatfield, R.; and Fukushima, R.S., 2005. Can lignin be accurately measured ? *Crop Science*. 45 : 832-839.
- Hatfield, R.; and Vermerris, W., 2001. Lignin formation in plants. The dilemma of linkage specificity. *Plant Physiology* : 126 : 1351-1357, www.plantphysiol.org.
- He, L.; and Terashima, N., 1990. Formation and structure of lignin in monocotyledons. III. Heterogeneity of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) lignin with respect to the composition of structural units in different morphological regions. *Journal of Wood Chemistry and technology*. 10 (4) : 435-459.
- Henkes, S.; Sonnewald, U.; Badur, R.; Flachmann, R.; and Stitt, M., 2001. A Small Decrease of Plastid Transketolase Activity in Antisense Tobacco Transformants Has Dramatic Effects on Photosynthesis and Phenylpropanoid Metabolism. *The Plant Cell*. 13 (3) : 535-551.
- Hess, K.; Kiessing, H.; and Gundermann, J., 1941. X-ray and electron-microscopic investigations of the process of grinding of cellulose. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 49 : 64-82.
- Hoareau, W., 2005. Valorisation de la bagasse de canne à sucre. Chimie, photochimie et élaboration de panneaux et composites. Thèse de doctorat en chimie. Novembre 2005. Université de La Réunion. 216 p.
- Hoareau, W.; Oliveira, F.B.; Grelier, F.; Siegmund, B.; Frollini, E.; and Castellan, A., 2006. Fiberboard based on sugarcane bagasse lignin and fiber. *Macromolecular Material and Engineering*. 291 : 829-839.
- Hoffmann, L.; Maury, S.; Martz, F.; Geoffroy, P.; and Legrand, M., 2003. Purification, cloning, and properties of an acyltransferase controlling shikimate and quinate ester intermediates in phenylpropanoid metabolism. *Journal of Biological Chemistry*. 278, 95-103.
- Hoffmann, L.; Maury, S.; Bergdoll, M.; Thion, L.; Erard, M. and Legrand, M., 2001. Identification of the enzymatic active site of tobacco caffeoyl-coenzyme A O-methyltransferase by site-directed mutagenesis. *Journal of Biological Chemistry*. 276 (39) : 36831-36838.
- Hugot E., 1987. La Sucrierie de Canne, Collection Tech & Doc, Lavoisier. 3^{ème} Ed., 1018 p.
- Humm, M., 2001. Observation on the suppression of sugarcane flowering using ethephon on the Kwazulu-Natal South coast. Proceedings of the South African Sugarcane technologists Association. 75 (2), 6 : 187-191.

- Hunsigi, G., 1995. Bagasse : The future fibre of the tropics and sub-tropics for the pulp and paper industry. Sugarcane Agro-Industrial Alternatives. Ed Singh G.B. and Solomon, S. 59-75.
- Hassuani, SL; Silva, JEAR-da ; and Neves, JLM, 2005. Sugarcane trash recovery alternatives for power generation. *Zuckerindustrie*. 130 (10).781-786.
- Ibrahim, H.; Abdel Rahim, S.; and Tohamy, M.A., 1995. Hilight on short fibred cellulosic material. Rakta, Alexandria : 69.
- Inman-Bamber, N.G.; Bonnette, G.D.; Spillman, M.F.; Hewitt, M.L.; and Jaxkson, J., 2008. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. *Australian journal of agricultural research*. 59c(1) : 13-26.
- Irvine, J.E.; and Benda, G.T.A., 1979. Genetic potential and restraints in *Saccharum* as an energy source. Symposium proceedings : Alternative uses of sugarcane for development. Caribe Hilton Hotel, San Juan, March 26 and 27, 1979.
- Jackson, P.A. (1994). Genetic relationships between attributes in sugarcane clones closely related to *Saccharum Spontaneum*. *Euphytica*. 79 : 101-108.
- Jacquet, G., 1997. Structure et réactivité des lignines de graminées et des acides phénoliques associés : développement des méthodologies d'investigation. Thèse de l'Université Aix-Marseille 3. Aix-En-Provence, France. 200 p.
- Jakob, K.; Zhou, F.S.; and Paterson A.H., 2009. Genetic improvement of C4 grasses as cellulosic biofuel feedstocks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 45 (3) : 291-305.
- James, N. I.; and Miller, J. D., 1972. Shoot apex development in early-, mid-, and late-season flowering sugarcane clones. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, 14th Congress 1971. Ed. Franklin Press Inc. Baton Rouge : 334-340.
- Jane, M. ; Paiva, F. ; and Frollini, E., 2002. Sugarcane reinforced phenolic and lignophenolic composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 83 : 880-888.
- Jannoo, N.; Grivet, L.; Seguin, M.; Paulet, F.; Domaingue, R.; Rao, P. S.; Dookun, A.; D'Hont, A. and Glaszmann, J. C., 1999. Molecular investigation of the genetic base of sugarcane cultivars. *Theoretical and Applied Genetics*. 99 (1-2) : 171-184.
- Jouanin, L., 2004. Les lignines, Biologie cellulaire, INRA Versailles. 23 diapo. www.biologie.univ-mrs.fr/upload/p210/Cours_2004_lignine.pdf
- Julien, M.H.R., 1973. Phsiology of flowering in *Saccharum*. I. Daylength control of floral initiation and development in *S. spontaneum* L. *Journal of Experimental Botany*. 24 : 549-557.
- Julien, M.H.R.; Soopramanien, G.C.; and Laurence D., 1974. Juvenility, senility, climate and flowering in *Saccharum*. Proceeding of International Society of Sugar Cane Technologists. 15 : 984-990.
- Julien, M.H.R.; Delaveau P.; Soopramanien G.C. and Martiné, J.F., 1978. Age, time of harvest and environment as factors influencing differences in yield between flowering and vegetative cane. Proceedings of Intrnational Society of Sugar Cane Technologists. 16 : 1771-1789.
- Jung H.G.; and Vogel, K.P., 1992. Lignification of switchgrass (*Panicum virgatum*) and big bluestem (*Andropogon gerardii*) plant parts during maturation and its effect on fiber degradability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 59 : 169-176
- Jung, H.G.; and Deetz, D.A., 1993. Cell wall lignification and degradability. In Jung, H.G.; Buxton, D.R.; Hartfield, R.D.; and Ralph, J. Ed. *Forage Cell Structure and Digestibility*. 315-346
- Keeping, M.G.; and Meyer, J.H., 2002. Calcium silicate enhances resistance of sugarcane to the African stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera : Pyradilae). *Agricultural and Forest Entomology*. 4 : 265-274
- Keeping, M.G. ; Kvedaras, O.L. ; and Burton, A.G., 2009. Epidermal silicon in sugarcane : Cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina*. *Environmental and Experimental Botany*. 66 (1) : 54-60

- Kemajuan L.; and Persekutuan P., 1969. A preliminary study on pulp and paper from bagasse. Prepared by : Industrial Studies & Surveys Unit. Federal Industrial Development Authority. 8th August 1969. Kuala Lumpur, Malaysia. 78 p.
- Kennedy, J.F. ; Pimentel, M.C.B. ; Meto, E.H.M. ; and Lima-Filho, J., 2007. Sucrose biosensor as an alternative tool for sugarcane field samples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 87 : 2266-2271. DOI : 10.1002/jsfa.2982
- Kessari, M.E. ; and Langellier, P., 2005. Evaluation des productions mondiales de bagasse et de résidus de récolte. Disponibilité pour le futur. Projet UCLOS. CIRAD CA, 30 p.
- Khristova, P. ; Kordsachia, O. ; Patt R. ; Karar, I. ; and Khider, T., 2006. Environmentally friendly pulping and bleaching of bagasse. *Industrial Crops and Products*. Ed. Elsevier. 23 : 131-139
- Kiesewetter, J. and Hoppesteyn, P.D.J., 2006. ULCOS, Projet n° 515960, sous projet 7. Biomass-based steel production. Executive summary. 27 p.
- Kingston, G.; Berthelsen, S.; Hurney, A.; Rudd, A.; and Noble, A., 2005. Impact of calcium silicate amendments on sugarcane yield and soil properties in Queensland, Australia. III. Korndorfer, G., Coelho, L. ; Avila Rodrigues, F. –de, Silicon in Agriculture Conference, 22-26 October 2005 , Uberlandia, Universidade Federal de Uberlandia, Brazil : 107.
- Klass, D. 1998. Biomass for renewable energy fuels, and chemical. Ed. Elsevier - Academic Press ISBN 13 : 978-0-12-410950-6. 651 p.
- Kokta, B.V.; and Ahmed, A., 1998. Steam explosion and pulping. In : Environmental Friendly Technologies for the Pulp and Paper Industry. Ed. Young RA & Akhtar M, John Wiley & Son Inc. Chapter 6 : 191-214.
- Kothari, R.M., 1997. Bagasse preservation. Yhapar Corporate Research and Development Centre. Patiala, India. : 1-57.
- Krapp, A. ; Quick, W.P. ; and Stitt, W., 1991. Ribulose 1,5-biphosphate carboxylase-oxygenase decrease when glucose is supplied to mature spinach leaves via transcription stream. *Planta*. 186 : 58-59.
- Kvedaras, O.L. ; Byrne M. ; Coombre, N.E. ; and Keeping, M.G., 2009 . Influence of plant silicon and sugarcane cultivar on mandibular wear in the stalk borer Eldana saccharina. *Agricultural and Forest Entomology*. 11 (3) : 301-306.
- Kvedaras, O.L. ; and Keeping, M.G. ; 2007. Silicon impedes stalk penetration by the borer Eldana saccharina in sugarcane. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 125 (1) : 103-110. DOI 10.1111/j.1570-7458.2007.00604.x
- Lacey, J., 1974. Moulding of sugar-cane bagasse and its prevention. *Annals of Applied Biology*. 76 : 63-76.
- Lakshmanan P.; Geijskes R.J.; Aitken K.S.; Grof C.L.P.; Bonnett G.D.; and Smith G.R., 2005. Sugarcane biotechnology: The challenges and opportunities. August 2005: *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*. 41 : 345-363.
- Lam, H.Q. ; Le Bigot, Y. ; Denis, G. ; Thao, V.H.; and Delmas, M., 2005. Location and composition of silicon derivatives in rice straw pulp obtained by organic acid pulping. *Appia Journal*, 58 (3) : 214-217.
- Lam, T.B.T.; and Liyama, K., 2000. Characteristics of senescent straw cell wall of dwarf, semi-dwarf and normal strains of rice (*Oryza sativa*) plants. *Journal of Wood Science*. 46 : 376-380.
- Lam, E.; Shine, J. Jr ; Da Silva, J. ; Lawton, M. ; Bonos, S. ; Calvino, M. ; Carrer, H. ; Silva-Filho, M.C. ; Glynn, N. ; Helsel, Z. ; Ma, J. ; Richard, E. ; Souza, G.M. ; and Ming, R., 2009. Improving sugarcane for biofuel: engineering for an even better feedstock. *Global Change Biology Bioenergy*. 1 : 251-255.
- Laurie C.K. 1978. Separation – a process for producing high quality sugar cane fibres for pulping and for use in composition panels. TAPPI, non wood plant fiber pulping. Progress Report. 9, 83-89.

- Leal, E.R.; Rodriguez-Valquez, R.; and Galindo, T., 1994. Separation of phenolic compounds from sugarcane bagasse pith and their determination by HPLC. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 14 (3) : 369-382.
- Legaz, M.E.; Armas de. R.; Piñon, D.; and Vincente, C., 1998. Relationship between phenolics-conjugated polyamines and sensitivity of sugarcane to smut (*Ustilago scitaminea*). *Journal of Experimental Botany*. 49 (327) : 1723-1728.
- Levy, L.M.S.; Coelho, A.; Kruger von-, W.M.A.; Gonçalves M.S.M.; Santos, M.F.; Valente, R.H.; Santos, E.O.; Rocha, S.L.G.; Perales, J.; Domont, G.B.; Teixeira, K.R.S.; and Bisch P.M., 2008. Protein expression profile of *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAL5, a sugarcane endophytic plant growth-promoting bacterium. *Proteomics*. 8 : 1631-1644. DOI 10.1002/pmic.200700912
- Lewis N.G.; and Lantzy T.R. 1989. Lignin in adhesives : Introduction and historical perspectives. In ACS Symposium Series - American Chemical Society. Chapter 2. 385 : 13-26.
- Liese W.; and Walter K. 1978. Deterioration of bagasse during storage and its prevention. *Revista Floresta* : 65-70.
- LiQin, D.; PeiQiang Y.; Rossnagel, B.G.; Christensen, D.; and McKinnon J.J., 2009. Physicochemical characteristics, hydroxycinnamic acids (ferulic acid, *p*-coumaric acid) and their ratio, and in situ biodegradability: comparison of genotypic differences among six barley varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 57 (11) : 4777-4783.
- Lloyd, H.I.; and Pillay, M., 1980. The development of an improved method for evaluating sugarcane for resistance to smut. *Proceedings of the South African Sugar Technologists*. 54 : 168-172.
- Luca E.F. -de; Feller C.; Cerri C.C.; Barthès B.; Chaplot V.; Campos D.C.; and Manechini C., 2008. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 32 : 789-800.
- Ma, J.F. ; Yamaji, N. ; Mitani, N. ; Tamai, K. ; Konishi, S. ; Fujiwara, T. ; Katsuhara, M.; and Yano, M., 2007. An efflux transporter of silicon in rice. *Nature (London)*. 448 (7150) : 209-212.
- Ma J.F.T. ; Yamaji K. ; Mitani N. ; Konishi N. ; Katsuhara S. ; Ishiguro M. ; Murata M. ; Yano Y.M., 2006. A silicon transporter in rice. *Nature (London)*. 440 (7084) : 688-691.
- Macedo I de Carvalho; Azevedo Ramos da Silva J.E and Lima Verde Leal MR. 2003. Greenhouse gas (GHG) emissions in the production and use of ethanol in Brazil: Present situation (2002). Dec 2003. Document NIPE/UNICAMP, CTC. Copersucar. 47 p.
- Macheix J-J. ; Fleuriet A.; and Jay-Allemand C., 2005. Les composés phénoliques des végétaux. Un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 192 p.
- Maldas, D.; and Kokla, B.V., 1991. Studies on the preparation and properties of particle boards made from bagasse and PVC: II. Influence of the addition of coupling agents. *Bioresource Technology*. 35 (3) : 251-261.
- Mamman, A.S. ; Lee, J-M. ; Kim, Y-C. ; Hwang, I.T. ; Park, N-J. ; Hwang, Y.K. ; Chang, J-S. ; and Hwang, J-S., 2008. Furfural : hemicellulose / xylose-derived biochemical. *Biofuels Biopeoducts & Biorefining*. Ed. Society of Chemical Industry and John Wiley & son. 2 (5) : 438-454.
- Manechini, C; Ricci, A. ; and Donzelli, J.L., 2005. An overview of controlled and non-controlled weeds as influenced by sugarcane trash blankets. *Sugar Cane International*, Sept/oct 2005. 23 (5) : 11-14.
- Mann, S. ; Perry, C.C. ; William, R.J.P. ; Fyre, C.A. ; Gobby, G.C. ; and Kennedy, G.J., 1983. The characterization of the nature of silica in biological systems. *Journal of the Chemical Society, chemical Communication* N° 4 : 168-170.
- Martin, C. ; Marcet, M.; and Thomsen, A.B., 2008. Comparison between wet oxydation and steam explosion as pretreatment methods for enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Bioresources*. Issn 1930-2126. 3 : 670-683.

- Martin, C.; Klinke, H.; and Thomsen, A.B., 2007. Wet oxydation as a pretreatment method for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse. *Enzyme Microbial Technology*. 40 : 426-432.
- Martin, C.; Klinke, H.B.; Marcet, M.; Hernández, E.; and Thomsen, A.B., 2007. Study of the phenolic compounds formed during pre-treatment of sugarcane bagasse by wet oxidation and steam explosion. *Holzforschung*. 61 (5) : 483-487.
- Martin, C.; Galbe, M.; Nilvebrant, N-O.; and Jönsson, L.J., 2002. Comparaison of the fermentability of enzymatic hydrolysates of sugarcane bagasse pretreated by steam explosion, using different impregnating agents. *Applied Technology and Biotechnology*. 98-100 : 699-716.
- Martiné, J-F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle Diplôme. Thèse de doctorat : Agronomie : Paris, INAPG. 131 p.
- Martine, J-F.; and Lebret P, 2001. Modelling the water content of the sugarcane stalk. Proceedings of the Annual Congress South African Sugar Technologists' Association. 75 : 211-214.
- Mathew, S.; and Abraham, T.E., 2004. Ferulic acid: an antioxydant found naturally in plant cell wall and feruloyl esterases involved in its release and their application. *Critical Reviews in Biotechnology*. 24 : 59-83.
- McCormick, A.J.; Cramer, M.D.; and Watt, D.A., 2008. Regulation of photosynthesis by sugars in sugarcane leaves. *Journal of plant physiology*. 165 (17) : 1817-1829.
- McCormick, A.J.; Cramer, M.D.; Botha, F.C.; and Watt, D.A., 2007. Regulation of photosynthetic activity by sucrose and hexose in leaves of sugarcane. *South African Journal of Botany*. 73 (2) : 332.
- McCormick, A.J.; Cramer, M.D.; and Watt, D.A., 2006. Sink strength regulates photosynthesis in sugar cane. *New Phytologist*. 171 : 759-770.
- McLaughlin, S.B.; Samson, R.; Bransby, D.; and Wiseloge, A., 1996. Evaluating physical, chemical and energetic properties of perennial grass as biofuel. In: Proceedings of Bioenergy'96. Seventh National Bioenergy Conference. Partnerships to develop and apply biomass technologies. Nashville Tennessee, 15-20 sept 1996. : 1-8.
- McLaughlin, SB; Ugarte, DGDL; Garten, CT; Lynd, LR; Sanderson, MA; Tolbert, VR; and Wolf, DD., 2002. High- value renewable energy from prairie grasses. *Environmental Science and Technology*. 36, (10) : 2122-2129.
- Megiatto, Jr J.D.; Silva, C.G.; Rosa, D.S.; and Frollini, E. 2008. Sisal chemically modified with lignins : correlation between fibers and phenolic composites properties. *Polymer Degradation and Stability*. Ed. Elsevier. 93 (6) : 1109-1121.
- Midmore D. L., 1980. Effects of photoperiod on flowering and fertility of sugarcane (*Saccharum* spp.). *Field Crop Research*. 3 : 65-81.
- Miguez, F. ; Zhu, W. ; Humphries, S. ; Bollero, G.A. ; and Long, S.P., 2009. A semimechanistic model predicting the growth and production of the bioenergy crop *Miscanthus x giganteus* : description, parameterization and validation. *Global Change Biology Bioenergy*. 1 : 282-296. doi: 10.1111/j.1757-1707.2009.01019.x
- Molina, V.; Noa, M.; Arruzazabala, L.; Carbajal, D.; and Mas, R., 2005. Effect of D-003, a mixture of long chain aliphatic acids purified from sugarcane wax, on cerebral ischemia in Mongolian Gerbils. *Journal Medical Food*. 8 (4) : 482-487.
- Monties, B. 2007. A look back upon some « non-conventional » biochemical mechanisms of supramolecular structures assembling during peroxidase-oxidase catalyzed polymerization of lignins and the related deshydropolymers (DHP) formation. *Cellulose Chemistry and Technology*, 41 (9-10) : 495-504.
- Monties, B. 2005. Variabilité biologique des lignines. *Cellulose Chemistry and Technology*. 39 (5-6), 341-377.

- Monties B., 1989. Lignins. In : Methods in Plant Biochemistry, Ed. Dey P.M., Harborne, J.B. Academic Press, London. 1 : 113-157.
- Montiès, B. 1980. Les Lignines. In : Les Polymères Végétaux. Polymères Pariétaux et alimentaires non azoté. Vol 2, Part I. Ed. Monties B. Bordas - Gauthier-Villars.122-155.
- Moore P.H.; and Nuss, K.J., 1987. Flowering and flower synchronization. In: Sugar improvement through breeding. *Developments in crop sciences*. 11 (HS) : 273-311.
- Moore, P.H.; and Buren, L.L., 1978. Gibberellin studies with sugarcane I. Cultivars differences in growth responses to gibberellic acid. *Crop Sciences* 17 : 443-446.
- Moore, P.H.; and Ginoza, H., 1979. Gibberellin studies with sugarcane. III Effects of rate and frequency of gibberellic acid applications on stalk length and fresh weight. *Crop Sciences*. 20 : 78-82.
- Morand, A., 2004. Bagasse cogeneration – Global review and potential. June 2004. Ed. WADE Edingburgh UK. 56 p.
- Morgan, R. ; Bruijn, J. ; Gonin, C.; and McMaster, L., 1974. Wet bulk storage of bagasse. Proceedings of the 15th Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. Durban. 3 :1973-1819.
- Morgenroth, B.; and Batstone, D., 2005. Development and prospects for drying bagasse by steam. *International Sugar Journal*. 107 (1279) : 410-415.
- Morrison, T.A. ; Jung, H.G. ; Buxton, D.R.; and Hartfield, R.D., 1998. Cell wall composition of maize internode of various maturity. *Crop Science*. 38 : 455-460.
- Mouille G. ; Lapiere, C. ; Jouanin L. ; Job D.; and Lorot-Gaudry J-F., 2006. Manipulation des voies de synthèse des synthons dédiés à la chimie verte. In La Chimie Verte, Ed. Colonna P., Tec & Doc. Lavoisier Paris. Chap 7 : 41-78.
- Mukherjee, S.K., 1957. Origin and distribution of *Saccharum*. *Botanical Gazette*. 119 : 55-61
- Mussatto, S.I.; Dragone, G.; and Roberto, I.C., 2007. Ferulic and p-coumaric acids extraction by alkaline hydrolysis of brewer's spent grain. *Industrial Crops and Products*. 25 (2) : 231-237.
- Nierop, K.G.L.; and Filley, T.R., 2007. Assessment of lignin and polyphenol transformations in oak (*Quercus robur*) dominated soil by C-TMAH thermochemolysis. *Organic Geochemistry*. 38 : 551-565.
- Noa, M.; Mendoza, S.; Mas, R.; and Mendoza, N., 2002. Effect of D-003, a mixture of high molecular weight primary acids from sugar cane wax, on CL4C-induced liver acute injury in rats. *Drugs Experimental Clinic Research*. 28 (5) : 177-183.
- Nutt, K.A. ; O'Shea, M.G.; and Allsopp P.G., 2004. Feeding by sugarcane whitegrubs induces changes in the types and amounts of phenolics in roots of sugarcane. *Environmental and Experimental Botany*. 51 : 155-165.
- Nuss, K.J., 1977. Recent experiments in the cane breeding glasshouse at the experiment station. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association. 51 : 27-29.
- Nuss, K.J., 1980. Effects of photoperiod and temperature on initiation and development of flowers in sugarcane. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association. 17 : 486-493.
- Ogier, J.C.; Ballerini, D.; Leygue, J.P.; Rigal ,L.; and Pourquié, J. 1999. Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Oil & Gas Science and technology*. Revue de l'IFP : 54 (1) : 67-94.
- Ou, S.; Luo, Y.; Xue, F.; Huang, C.; Zhang, N.; and Liu, Z., 2007. Separation and purification of ferulic acid in alkaline-hydrolysate from sugarcane bagasse by activated charcoal adsorption/anion macroporus resin exchange chromatography. *Journal of Food Engineering* 78 : 1298-1304.
- Ou, S.Y.; Luo, Y.L.; Huang, C.H.; and Jackson, M. 2009. Production of coumaric acid from sugarcane bagasse. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 10 (2) : 253-259.

- Ouensanga A., 1989. Variation of fiber composition in sugar cane stalks. Wood and fiber science. *Journal of the Society of Wood Science and Technology*, Madison, WI, USA. Issn 0735-6161. 21 (2) : 105-111.
- Paillat, J-M. ; Fraboulet P.; and Lorré M., Mai 1997. Dessiccation et conditionnement de paille de canne à sucre. Mesures sur canne récoltées en vert. M Caruel à Sainte-Suzanne. Document 79/77 CIRAD Réunion, 32 p.
- Paliatseas, E.D., 1962. Further studies in flowering of sugar cane in Louisiana. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists. 11 : 505-515.
- Palmqvist, E.; Hahn-Hägerdal, B.; Galbe, M.; and Zacchi, G., 1996. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II : inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresource Technology* : 74 : 25-33.
- Pande, H. 1998. Les fibres non ligneuses et l'offre mondiale de fibre. *Unasylva*, ISSN 0251-1053. Vol. 49-1998/2, 13 p. <http://www.fao.org/docrep/W7990F/w7990f08.htm>
- Pandey, A. ; Soccol, C.R. ; Nigam, P.; and Soccol, V.T., 2000. Biotechnological potential of agro-industrial residues I: Sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*. 74 (1) : 69-80.
- Park, Y.; Doherty, W.O.S.; and Halley, P.J., 2008. Developping lignin-based resin coatings and composites. *Industrial Crops and Products*. 27 : 163-167.
- Parry, G., 1981. Le cotonnier et ses produits. Techniques agricoles et production tropicales. Ed. Maisonnneuve & Larose, Paris, p. 223.
- Pate, F.M., 1979. Nutritive changes of sugarcane with advancing maturity. Beef and Cattle report. University of Florida. Agricultural Research and Education Center, Belle Glade. Chapter 3, 42-45. www.animal.ufl.edu/extension/beef
- Pasquini, D.; Belgacem, M.N.; Gandini, A.; and Silva Curevelo, A.A. -da., 2006. Surface esterification of cellulose fiber : Caractérisation by DRIFT and contact measurements. *Journal of Colloid and interface Science* : 295, 79-83.
- Paturau J.M., 1989. By-products of sugarcane in industry. Edt Elsevier, Amsterdam, 3rd edition.
- Payet, B.; Shum Cheong, A.; and Smadia, J., 2006. Comparison of the concentration of phenolic constituents in sugar cane manufacturing products with their anti-oxydant activities. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 54 (19) : 7220-7278.
- Pereira, A.A.; Martins, G.F.; Antunes, P.A.; Conrado, R.; Pasquini, D.; Job, A.E.; Curvelo, A.A.S.; Ferreira, M.; Riul, A. Jr.; and Constantino, J.L., 2007. Lignin from sugar cane bagasse : extraction, fabrication of nanostructured films, and application. *Langmuir*. 23 : 6652-6659.
- Pessoa, Jr A.; Mancilha, I.M.; and Sato, S., 1997. Acid hydrolysis of hemicellulose from sugarcane bagasse. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 14 (3). 14 p.
- Petersen, M. ; Strack, D.; and Matern, U., 1999. Biosynthesis of phenylpropanoids and related compounds. In : Biochemistry of plant secondary metabolism. Ed. Wink M., CRC Press boca Raton, Fl. *Annuals Plants Reviews*. 151-221.
- Pilat, G., 2009. Vers des bio-carburants de seconde génération? Les potentialités d'utilisation du Peuplier comme culture énergétique. Rencontres chercheurs / enseignants «Nouvelles sources d'énergie» Centre départemental de Documentation pédagogique. Tours 11 Février 2009. Présentation pdf, 52 diapo.
- Piperis, G. ; and D'Hont, 2001. Chromosome composition analysis of various *Saccharum* interspecific hybrids by genomic *in situ* hybridisation (GISH). International Society of Sugar Cane Technologists Congress. II, 565.
- Poke, F.S. ; Potts, B.M. ; Vaillancourt, R.E.; and Raymond, C.A., 2006. Génétic parameters for lignin, extractives and decay in Eucalyptus globulus. *Annals of Forest Science*. 63 (8) : 813-821.
- Pouzet, D. ; Lejars, C.; and Guichard, R., 2008. Etude de faisabilité d'une unité pilote de valorisation énergétique de la biomasse cannière en Guadeloupe. Programme de recherche et de

- développement Cann'elec. Production d'électricité à partir de biomasse. ODEADOM/CIRAD/IRIS-ingénierie, juin 2008. Vol. I. Situation initiale 50 p.
- Pouzet, D. ; Velle, A.; and Rassaby, A., Février 2002. Estimation des résidus de récolte de la canne à sucre. Bilan des études menées au cours des campagnes 2000 et 2001 sur l'île de La Réunion. CIRAD-CA Programme CAS – Pôle Canne à Sucre. Saint Denis, 14 p.
- Pribil, M. ; Hermann, S. R. ; Dun, G. D. ; Karno ; Ngo, C. ; O'Neill, S. ; Wang, L. ; Bonnett, G. D. ; Chandler, P. M. ; Beveridge, C. A.; and Lakshmanan, P. 2007. Altering sugarcane shoot architecture through genetic engineering: prospects for increasing cane and sugar yield. Proceedings of the 2007 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists held at Cairns, Queensland, Australia, 8-11 May 2007. 29, 251-257.
- Pulido, R, 1987. Mineralización de nitrógeno y pérdida de nutrientes por quema un un campo de caña de azúcar. Tesis de Licenciatura. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de ciencias. 113 p.
- Rainey, T., 2009. Bagasse paper a better option than co-generation. Sugar Research Institute (SRI), Queensland University of Technology. In farmonline Register North Queensland. <http://nqr.farmonline.com.au/news/state/sugar>
- Ramos, L.P., 2003. The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. *Quimica Nova*. 26 (6), 863-871.
- Rao P.S., 2007. Varieties for Sugar Association of Caribbean Sugar Cane Industries. Presentation power Point. 35 slides. In Wisben Workshop, Guyana, 21-27 October 2007. West Indies Central Sugar Cane Breeding Station (WICSCBS).
- Rao, P.S.; and Albert-Thenet, J.R., 2005. Fuel cane biomass potential for year round energy production. Proc. ISSCT , Guatemala. Vo 1.
- Rao, P.S.; and Kennedy, A., 2004. Genetic improvement of sugarcane for sugar, fibre and biomass. Ministry of Agriculture Annual Conference, Barbados. 13 p.
- Rayburn, A.L.; Crawford, W.; Rayburn C.M.; and Juvik J.A., 2009. Genome size of three *Miscanthus* species. *Plant Molecular Biology Reporter*. 27 : 184-188.
- Razafimbelo, T.; Barthes, B.; Larre Larrouy, M.C.; Luca, E.F. -de; Laurent, J.Y.; Cerri, C.C.; and Feller, C. 2006. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 115 (1-4) : 285-289.
- Rezayati-charani, P.; and Mohammadi-Rovshandeh, J., 2005. Effect of pulping variables with dimethyl formamide on the characteristics of bagasse-fiber. *Bioresource Technology* : 96 (15) 10 : 1568-1669.
- Riboulet, C. ; Guillaumie, S. ; Mechin, V. ; Bosio, M. ; Pichon, M. ; Goffner, D. ; Lapierre, C. ; Pollet, B. ; Lefevre, B. ; Martinant, J.P.; and Barrière, Y., 2009. Kinetics of phenylpropanoid gene expression in maize growing internodes : relationship with cell wall deposition. *Crop Science*. 49 (1) : 211-223.
- Riboulet, C. ; lefevre, B. ; Denoue, D.; and Barriere, B., 2008. Genetic variation in mais cell wall for lignin content, lignin structure, p-hydroxycinnamic acid content and digestibility in set of 19 lines at silage harvest maturity. *Maydica*. 53 (1) : 11-19.
- Rinaudo, M. ; and Joseleau, J.P. 2008. La biomasse végétale peut-elle concurrencer le pétrole ? Centre de Recherche Sur les Macromolécules Végétales, CNRS. 32 diapo, 5 décembre 2008. www.cermav.cnrs.fr/etat_art/biomasse_petrole.pdf
- Rincón Castillo, A., 2005. Agronomic and nutritional evaluation of sugar cane varieties used as bovine forage resource at Piedemonte Llanero (Meta, Colombia). *Revista Corpioca*. 66 : 60-68.
- Rizk, T.Y. ; Khalil, H.A.; and Nosaer, H.M., 2004. Flower initiation of certain groups of sugar cane varieties to photoperiod regimes and growth regulators. *Egyptian Journal of Agronomy*. 26 : 9-19.

- Roland, J.C., 1980. Ultrastructure et texture des polysaccharides dans la paroi des cellules végétales. In : Les Polymères Végétaux. Polymères Pariétaux et alimentaires non azoté. Vol 2, Part I. Ed. Monties B. Bordas - Gauthier-Villars. 46-65.
- Romanoschi, O.; Romanoschi, S.; Collier, J.R.; and Collier, B.J., 1997. Kenaf alkali processing. *Cellulose Chemistry and Technology*. 31 : 347-359.
- Ruggiero, R.; Machado, A.E.H.; Gardrat, C.; Hoareau, W.; Grelier, S.; Siegmund, B.; and Castellan, A., 2005. Photodegradation of sugar cane bagasse acidolysis lignins. *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 173 : 150-155.
- Saad, M.B.W.; Oliviera, L.M.R.; Cândido, R.G.; Quintana, G.; Rocha, G.J.M.; and Gonçalves, A.R., 2008. Preliminary studies on fungal treatment of sugarcane straw for organosolv pulping. *Enzyme and Microbiological Technology*. 43 : 220-225.
- Salas ,M. ; Aumont, G. ; Biessy, G.; and Magnié, E., 1992. Effect of variety, stage of maturity and nitrate fertilization on nutritive values of sugar canes. *Animal Feed Science and Technology*. 39 (3/4) : 265-277.
- Sales, F.G.; Maranhão, L.C.A.; Filho, N.M.L.; and Abreu, C.A.M., 2007. Experimental evaluation and continuous catalytic process for fine aldehyde production from lignin. *Chemical Engineering Science*, 62 : 5386-5391.
- Salgado, G.S.; Nuñez, E.R.; Cabriaes, P.J.J.; Etchevers, B.J.D.; Palma-Lopez D.J.; and Soto, H.M.R., 2001. Eficiencia de recuperacion del nitrogeno fertilizante en soca de caña de azucar sometida a diferentes manejos de fertilizacion. *Terra*. 19 : 155-162.
- Sampietro, A.; Sgariglia, M.A.; Soberon, J.R.; and Vattuone, M.A., 2007. Effects of sugarcane straw allelochemicals on growth and physiology of crops and weeds. *Allelopathy Journal*. 19 (2) : 351-360.
- Sampietro, A.; Vattuone, M.A., 2006. Sugarcane straw and its phytochemicals as growth regulators of weed and crop plants. *Plant Growth Regulation*. 48 : 21-27.
- Santiago, R. ; Armas, R. ; Fontaniella, B. ; Vincente, C.; and Legaz, M.E., 2009. Changes in soluble and cell wall-bound hydrocinnamic and hydroxybenzoic acids in sugarcane cultivars inoculated with *Sporisorium scitamineum* sporidia. *European Journal of Plant Pathology*. 124 (3) : 439-450.
- Sanjuán, R.; Riviera, F.; and Fuentes, F.J., 1999. Evaluation of adhesive mixtures of phenol-formaldehyde and organosolv lignin of sugarcane bagasse. *Holz-als-Roh-und-Werkstoff* (Germany). 57 (6) : 418.
- Sanjuán, R.; Anzaldo, J.; Vargas, J.; Turrado, J.; and Patt, R., 2001. Morphological and chemical composition of pith and fibers from mexican sugarcane bagasse. *Holz als Roh und Werkstoff* 59 (6) : 447-450.
- Sartori, M.M.P.; and Leão, A.L., 2000. Available enregy from sugarcane post harvest residues. World renewable energy congress VI. Ed. Sayigh A.A.M., Elsevier. 1328-1331.
- Satge C., 2002. Etude de nouvelles stratégies de valorisation de mono et polysaccharides. Université de Limoges , Chimie - Chimie Physique. Thèse N° d'ordre : 25-2002.
- Scalbert A., 1984. Caractérisation des lignines de paille de blé : fractionnements, associations avec les oses et les acides phénoliques. Thèse, Institut National Agronomique de Paris-Grignon. 58 p.
- Schlutz, T.P. ; and McGinnis, G.D. 1984. Final report. Evaluation of a steam explosion pretreatment for alcool production from biomass. USDA-SEA, Missisipi State University.
- Schweitzer, J. A.; Bailey, J. K.; Rehill, B. J.; Martinsen G.D.; Hart S.C.; Lindorth R.L.; Keim P.; and Whitham T.G., 2004. Genetically based trait in a dominant tree affects ecosystem processes. *Ecology Letter*. 7 : 127-134.
- Sene, L.; Converti, A.; Felipi, M.G.A.; and Zilli, M., 2002. Sugarcane bagasse as alternative packing material for biofiltration of benzene polluted gazeous streams : A preliminary study. *Bioresource Technology*. 83 : 153-157.

- Setty, T.K.R.; Vishwanatha, G.K.; and Panth, M.G., 1995. Newsprint, paper and chemicals from sugarcane bagasse. *Sugarcane Agro-Industrial Alternatives*. Ed. Singh, G.B.; Solomon, S. 5 : 79-97.
- Shaikh, H.M.; Pandare, K.V.; Nair, G.; and Varna, A.J., 2009. Utilization of sugarcane bagasse cellulose for producing cellulose acetate : Novel use of residual hemicellulose as plasticizer. *Carbohydrate Polymers*. 76 : 23-29.
- Sharma, R.K.; Yadav, K.R.; Maheshwari, V.L.; and Kothari, R.M., 2000. Bagasse preservation; A need for a biotechnological approach. *Critical Review in Biotechnology*. 20 (4) : 237-263.
- Singels, A.; Donaldson, R.A.; and Smith, M.A., 2005. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. *Field Crop Research*. 92 : 291-303.
- Singh, S.; Naidu, K.M.; and Tyagi, D.M., 1988. Effect of suppression of flowering on improvement of growth, yield and juice quality in sugarcane. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 58 (1) : 71-73.
- Singh, P.; Shrivastava, A.K.; Suman, A.; Arya, N.; Tiwari, P.; Rai, R.K.; Singh, J.; and Singh, A.K., 2009. Allelopathic effects of hydroxamic acids from sugarcane leaves on germination and growth of crops. *Allelopathy Journal*. 23 (1) : 203-212.
- Somani, K.K.; and Grewal, S.S., 1995. Development of agglomerates products industry on sugar mill bagasse. *Sugarcane Agro-Industrial Alternatives*. Ed Singh, G.B.; Solomon, S. 6 : 99-116.
- Sun, J.X.; Sun, X.F.; Zhao, H.; and Sun, R.C., 2004. Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. *Polymer Degradation and Stability*. Ed. Elsevier : 84 (2) : 331-339.
- Sun, J.X.; Sun, X.F.; Sun, R.C.; and, Su Y.Q., 2004 a. Fractional extraction and structural characterization of sugarcane bagasse hemicelluloses. *Carbohydrate Polymers*. 56 : 195-204.
- Sun, J.X.; Sun, R.C.; Sun, X.F.; and Su, Y.Q., 2004 b. Fractional and physico-chemical characterization of hemicelluloses from ultrasonic irradiated sugarcane bagasse. *Carbohydrate Research*. 339 : 290-300.
- Sunil, H.K.; and Lawrence, M.J. 1996. Quantitative genetics of sugarcane. I. A large-scale evaluation of *Saccharum* germplasm. *Sugar Cane*. 6 : 3-10.
- Tai, P.Y.P.; Powell, G.; Perdomo, R.; and Eiland, B.R., 1996. Changes in sucrose and fibre contents during sugarcane maturation. *Sugar Cane*. 6 : 19-23.
- Tai, P.Y.P., 1993. Correlation between fiber content and juice quality of some CP sugarcane varieties. Belle Glade Research Report : 55-60.
- Thames, J.L.; Collier, B.J.; and Collier, J.R., 1994. Production and evaluation of sugarcane fiber geotextiles. AATCC International Technical Conference and Exhibition, Research. October 11-14. Triangle Park, NC. 42-47.
- Tolentino, G.; Oliviera Florentino, H. -De ; and Sartori, M.M.P., 2007. Metodologia e técnicas Experimentais. Modelagem matemática para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de açúcar com menor custo. *Bragantia Campinas*. 66 (4) : 729-735.
- Uriarte, M. ; Yackulic, C.B. ; Cooper, T. ; Flynn, D. ; Cortes, M. ; Crk, T. ; Cullman, G. ; McGinty, M. ; and Sircely, J., 2009. Expansion of sugarcane production in São Paulo, Brazil : Implications for fire occurrence and respiratory health. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 132 : 48-56.
- Van Dellewijn, C., 1952. Botanique de la canne à sucre. Centre Technique du sucre de la Guadeloupe et de la Martinique. Edt Veebman H & Zonen N.V., Wageningen, Hollande. 391 p.
- Vance, C. P. ; Kirk, T. K. ; and Sherwood, R. T., 1980. Lignification as a mechanism of disease resistance. *Annual Review of Phytopathology*. 18 : 259-288.
- Vandeputte, J., 2007. Pôle de compétitivité à vocation mondiale "Industries et Agro-Ressources". Présentation power point 04/10/2007. 41 p.
<http://glucidoc.2008.free.fr/PPT/Oui/Vandeputte.pdf>

- Van Der Klashorst, G.H.; and Strauss, H.F., 1986. The properties and potential utilization of industrial soda bagasse lignin. *Holzforschung*. 40 (6) : 375.
- Van Der Klashorst, G.H.; Cameron, F.A.; and Pizzi, A., 1985. Lignin-based cold setting wood adhesives structural fingerjoints and glulam. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 43 (11) : 477-481.
- Venter, J. S. M. and Van Der Klashorst, G. H., 1989. The recovery of by-products and pulping chemicals from industrial soda bagasse spent liquors. *Tappi Journal*. 1989. 72 : 3, 127-132.
- Viator, R.P.; Johnson, R.M.; Boykin, D.L.; and Richard jr., E.P., 2009. Sugarcane postharvest residue management in a temperate climate. *Crop Science*. 49 : 1023-1028.
- Viator, R.P.; Johnson, R.M.; Richard jr, E.P.; Waguespack, H.L.; and Jackson, W., 2008. Influence of non-optimal ripener applications and post harvest residues retention on sugarcane second ratoon yield. *Agronomy Journal*. 100 : 1769-1777.
- Viator, R.P.; Johnson, R.M.; Grimm, C.C. and Richard jr.; E.P., 2006. Allelopathic, autotoxic, and hormetic effects of postharvest sugarcane residues. *Agronomy Journal*. 98 : 1526-1531.
- Vincente-Chandler, J.; Silva, S.; and Figarella, J., 1959. The effect of nitrogen fertilization and frequency of cutting on the yield and composition of three tropical grasses. *Agronomy Journal*. 51 : 202-206.
- Wanabe, T.; Jansen, S.; and Osaki, M., 2006. Al-Fe interactions and growth enhancement in *Melastoma malabathricum* and *Miscanthus sinensis* dominating acid sulfate soils. *Plant, Cell and Environment*. 29 (12) : 2124-2132.
- Wang, L-P.; Jackson, P.A.; Lu, X.; Fan, Y-H; Foreman, J.W.; Chen, X-K.; Deng, H-H.; Fu, C.; Ma, L.; and Aitken, K.S., 2008. Evaluation of sugarcane x *Saccharum spontaneum* progeny for biomass composition and yield components. *Crop Science*. 48 (5-6) : 951-961.
- Weng, J.K.; Li, X.; Bonawitz, N.D.; and Chapple, C., 2008. Emerging strategies of lignin engineering and degradation for cellulosic biofuel production. *Current Opinion in Biotechnology*. 19 : 166-172.
- Widyorini, R. ; Xu, JianYing ; Umemura, K. ; and Kawai, S., 2005. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse. I: Effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. *Journal of Wood Science*. 51 (6) : 648-654.
- Wood, I.M., 1981. The utilization of field crops and crop residues for paper pulp production. Commonwealth Bureau of Pasture and Field Crops. *Field Crop Abstracts*. 34 (7) : 557-568.
- Yadar, K., 1990. Nature of phenolic compounds in soils treated with sugarcane trash and rice straw. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 38 (3) : 531-533.
- Yamaji, N. ; Mitatni, N. and Ma, JF., 2008. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *The Plant Cell*. 20 (5) : 1381-1389.
- Yoshida, M. ; Jiu, Y. ; Uchida, S. ; Kawarada, K. ; Ukagami, Y. ; Ichinose, H. ; Kaneko, S. ; and Fukuda, K., 2008. Effects of cellulose cristallinity, hemicellulose, and lignin on the enzymatic hydrolysis of *Miscanthus sinensis* to monosaccharides. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 72 (3) : 805-810.
- Youngquist, J.A.; English, B.E.; Spelter, H.; and Chow, P., 1993. Agricultural fibers in composition panels. In Maloney, Thomas M. ed. Proceedings of the 27th International Particleboard/Composite Material Symposium. 1993, March 30-31 - April 1. Washington State University : 133-152.